



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

**IMPLEMENTACIÓN DE VARIADORES
DE VELOCIDAD EN PLANTAS DE
BOMBEO PARA RIEGO**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO
(ÁREA ELÉCTRICA - ELECTRÓNICA)
P R E S E N T A:
JUAN CARLOS COSME ESPINOSA

DIRECTOR DE TESIS:
ING. ALFREDO MONTAÑO SERRANO



MÉXICO

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis está dedicada con todo mi cariño a mis padres por haberme brindado la oportunidad de culminar uno de mis más grandes anhelos, mi carrera profesional. Gracias por haberme guiado en los momentos más difíciles, por estar conmigo siempre y por sus sabios consejos.

Gracias a mi hermano por su apoyo, porque siempre fue un ejemplo de coraje y valentía, por enseñarme a cumplir metas y a conseguir lo que deseo.

Gracias a Dios por llenarme de dicha y bendiciones, por brindarme salud física y mental y por darme a personas tan maravillosas que me rodean.

Gracias a mis profesores por darme las herramientas necesarias para triunfar en esta vida y por enseñarme no solo conocimientos, sino experiencias de vida que siempre tendré en cuenta.

Gracias a la Universidad por ser una gran fuente de conocimientos y por brindar a este país profesionistas de la mejor calidad.

Gracias a mis amigos por su apoyo y compañía, por que juntos logramos llegar a nuestra meta en común.

ÍNDICE	PÁGINA
INTRODUCCIÓN	I
Capítulo 1 VARIADOR DE VELOCIDAD	
1.1 Que es un variador de velocidad	1
1.2 El inversor de frecuencia variable	3
1.3 Métodos de control de velocidad	6
1.4 Como seleccionar un variador de velocidad	8
1.5 Limitantes de los motores	8
1.6 Consideraciones en la carga	9
1.7 Protección de variadores de velocidad y motores	10
1.8 Ahorro de energía mediante los variadores de velocidad	15
1.9 Variadores de velocidad de tecnología estándar o básica	18
1.10 Variadores de velocidad de tecnología especial 12, 18 o más pulsos	19
Capítulo 2 SISTEMA DE BOMBEO	
2.1 Características Hidráulicas de un sistema de bombeo	21
2.2 Definición y clasificación de bombas	22
2.3 Bomba Vertical tipo turbina	23
2.4 Leyes de afinidad y curvas de capacidades nominales	26
2.5 Datos de rendimiento de bombas centrifugas	29
2.6 Datos del fabricante de bombas centrifugas	30
2.7 Influencia de los variadores de velocidad en la carga dinámica total	34
2.8 Elementos de Control y Protección en la conexión de Bombas	36
2.9 Motor eléctrico	39
2.10 Diseño de motores eléctricos	40
2.11 Partes de un motor eléctrico de inducción trifásico	41
2.12 Reducción de la capacidad en motores	43
2.13 Partes que integran una Planta de Bombeo	45
2.14 Elección de un equipo de bombeo	52
Capítulo 3 ENERGIA ELECTRICA Y COSTOS DE UN SISTEMA DE BOMBEO	
3.1 Factores que implican un mayor consumo de energía eléctrica	55
3.2 Costos del ciclo de vida de un equipo de bombeo	57
3.3 Influencia de los variadores de velocidad en el equipo de bombeo	58
3.4 Principio de control para velocidad variable de bombeo	61
3.5 Control a presión constante variando la velocidad del flujo	63
3.6 Equipo de medición eléctrica	64

Capítulo 4	
APLICACIÓN EN SISTEMA DE RIEGO	66

CONCLUSIÓN	
CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE TESIS	86

ANEXOS

ANEXO 1 PLANTA DE BOMBEO

ANEXO 2 DIAGRAMA UNIFILAR

ANEXO 3 DIAGRAMA DE CONEXIÓN VARIADOR DE VELOCIDAD

ANEXO 4 COTIZACION VARIADOR DE VELOCIDAD

ANEXO 5 TARIFAS ELECTRICAS 9-CU Y 9N

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

México actualmente cuenta con una superficie de 6.3 millones de hectáreas de riego con obras e instalaciones para el aprovechamiento de agua superficial y subterránea, el 54% corresponde a 82 Distritos de Riego y el 46% a obras de pequeña irrigación operadas por los propios productores. Sin embargo, los patrones de aprovechamiento del agua y la infraestructura han sido en general deficientes. En muchos casos, esta ineficiencia se ha traducido en la sobreexplotación de mantos acuíferos.

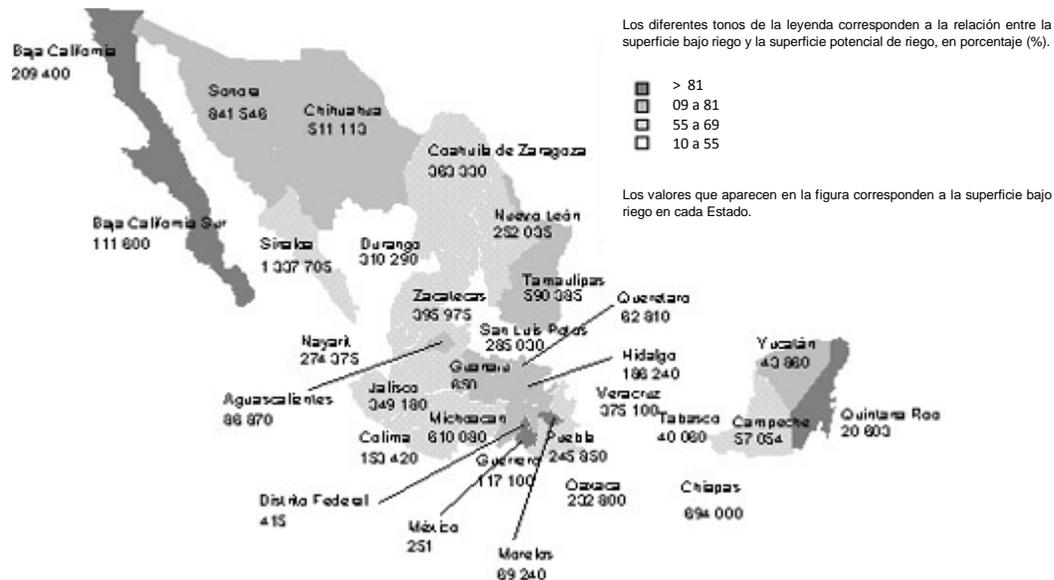
En México se tiene 654 acuíferos identificados, donde 104 son explotados en exceso, ya que de estos se extrae el 50% del agua subterránea que se utiliza. Desde el punto de vista económico, algunas consecuencias de la sobreexplotación de los acuíferos son: el incremento en los costos de extracción para bombear el agua que se encuentra a mayor profundidad, así como el requerimiento de una mayor cantidad de energía eléctrica. Debido a esto se tiene la necesidad de hacer un mejor aprovechamiento de la infraestructura construida y racionalizar el consumo de energía eléctrica, en beneficio de los productores agrícolas.

Se estima que más del 60% de los pozos agrícolas accionados con motor eléctrico, operan con una eficiencia inferior a la que exigen las Normas Oficiales Mexicanas en materia de eficiencia de bombeo y energética, aunado a que los usuarios persisten en aplicar agua subterránea en riego con técnicas tradicionales en las que se desperdicia más de la mitad del agua extraída del subsuelo. Esta situación ocasiona un círculo vicioso que no permite al usuario lograr la capacidad económica para mejorar su eficiencia, a la vez que se produce un enorme dispendio de los recursos de agua del subsuelo y de energía eléctrica en el país.

Desarrollo del riego

La superficie potencial de riego en función de la aptitud de la tierra es de 13,5 millones de ha, que se reducen a 9,8 millones de ha si se tiene en cuenta la disponibilidad de agua. Dicha superficie se muestra por entidad federativa en la figura 1, ilustrando que la mayor parte de las tierras subutilizadas se localizan en el trópico húmedo.

Figura 1. Superficie potencial de riego y porcentaje de dicha superficie bajo riego por entidad federativa.



Cabe destacar que más de una cuarta parte de la superficie bajo riego se concentra en dos estados del norte: Sinaloa (15 por ciento) y Sonora (11 por ciento).

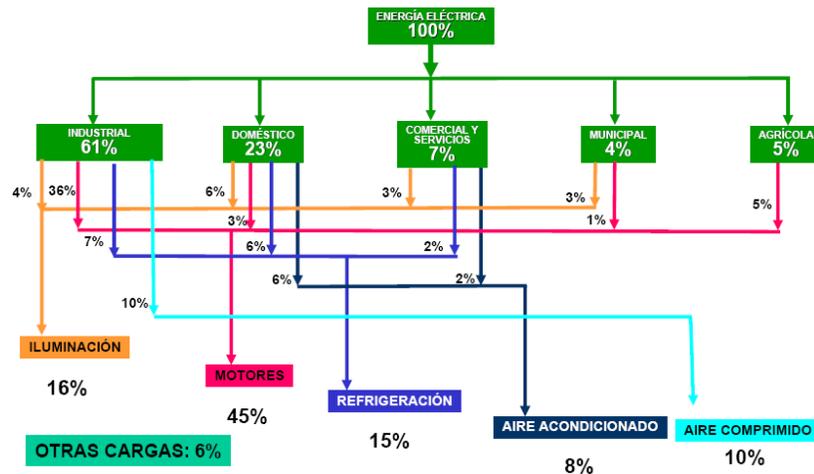
Sector Eléctrico

El sector Eléctrico Nacional, mantuvo desde 1962-1973 un costo medio de \$0.0002 por KWh. En los siguientes años, los incrementos no fueron sustantivos. Fue hasta 1979 en donde llego a costar \$0.0006, pasando a \$0.09 en 1988, logrando en el periodo un costo promedio de \$0.017. El costo de la energía en la mediana industria, por cada KWh creció de \$0.0915 en 1988 a \$0.70 en 2002. En 2008, se reporta que el costo alcanzo un valor de \$1.30 por KWh, frente al \$1.18 observado en 2007¹.

En lo referente al consumo de energía en el país, este paso de 56 980 GWh en 1962, a 100 000 GWh en 1991, con tasa media de crecimiento anual de 5.8%. En la década de los 90's, creció hasta 166 484 GWh. En el periodo 2001-2006 la tasa media de crecimiento anual disminuyo de 6.3% a 4.8%. La estimación en 2008 para el incremento anual del consumo eléctrico en 2008-2017 es de 4.8%. Por lo tanto, en 2008 el consumo de energía en el país pasó a ser de 233 079 GWh y se estima que para 2010 llegue a 265 756 GWh.

El bombeo agrícola a escala nacional, representa un consumo anual de 8,067 GWh, equivalente al 4.8% de las ventas de electricidad en el país.

Distribución del consumo de energía eléctrica



Instituciones en México que apoyan el ahorro de energía

El Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) es un organismo mexicano, privado con participación mixta, creado en 1990 a iniciativas de CFE y con la colaboración de las principales cámaras industriales del país, encaminado a realizar acciones de eficiencia energética dirigida a los usuarios de los sectores industrial, comercial, de servicios, doméstico y servicios municipales.

Nuevas tecnologías y ahorro de energía

Hoy se están explorando las nuevas fuentes primarias de energía, el carbón se utiliza de manera distinta, se está evaluando la inhibición de CO₂, la energía nuclear está a punto para un revival en todo el mundo, se están desarrollando los bio combustibles y explotando la energía eólica y marina, se están implementando medidas fiscales o certificados para incentivar el cambio y se están preparando muchas otras medidas. Sin embargo el tiempo necesario para poner en marcha algunas de estas iniciativas deja claro que el cambio no puede ser inminente.

Existe otro combustible el cual es la “eficiencia energética”. Consumir menos energía es una tarea que tiene el mismo efecto sobre el balance energético mundial que la introducción de otras energías alternativas. Aumentar la eficiencia energética es imprescindible

A medida que la electrónica avanza y la generación de energía es cada vez más costosa, se torna rentable y necesario hacer cada vez más eficientes los procesos de producción, éste es el caso de aquellos procesos que involucren bombas y que haciendo uso de los controles de frecuencia (variadores) pueden ser más eficientes y por lo tanto ahorrar energía.

Los sistemas de velocidad variables se pueden aplicar en aquellos sistemas en donde se requiere regular el flujo a diferentes cargas.

En muchas ocasiones es preciso trabajar durante mucho tiempo en condiciones de caudal inferiores al nominal. En esta situación se pueden realizar planteamientos que permitan ahorros energéticos considerables, implantando los sistemas de regulación de caudal más apropiado.

Los métodos de regulación de caudal se obtienen mediante:

- Modificación de la curva presión-caudal del sistema sobre el que trabaja la bomba.
- Modificación de la curva presión-caudal de la bomba.
- Modificación simultánea de ambas características (sistema y bomba).
- Arranque o paro de la bomba.

Debido a que actualmente la demanda de energía eléctrica es cada vez mayor las compañías que suministran el servicio se ven superadas, además los altos costos que implica para los usuarios el uso de motores eléctricos de gran potencia para el bombeo de agua hacen necesaria la implementación de nuevos equipos como son los variadores de velocidad. Por esto el objetivo de esta tesis es analizar las ventajas y desventajas que conlleva el implementar variadores de velocidad en equipos de bombeo, considerando que en los últimos años en México se ha optado por adoptar esta tecnología para las plantas de bombeo de riego agrícola.

Aunque en varios países del mundo como son: E.U.A, Inglaterra, Alemania, etc... se han implementado estos equipos con gran éxito, en México aun no se cuenta con la suficiente experiencia por lo que una mala selección del equipo o no tomar en cuenta algunos criterios puede causar daño al conjunto motor-bomba o al propio variador, por lo que en el presente trabajo también se proporcionan algunos criterios de selección y fenómenos a tener en cuenta para un adecuado funcionamiento de todo el sistema.

CAPITULO 1

VARIADOR DE VELOCIDAD

1.1 Que es un variador de velocidad

Un variador de velocidad VSD, por sus siglas en inglés (*Variable Speed Drive*) consiste de un motor y algunos controladores eléctricos.

Para controlar la velocidad de un motor de inducción de AC se requiere de un controlador usualmente llamado inversor.

Para entender cómo trabaja un inversor, es necesario entender cómo trabaja un motor de inducción.

Un motor de inducción trabaja como un transformador. Cuando el estator (devanados externos) es conectado a la fuente de potencia trifásica, un campo magnético es creado el cual gira a la frecuencia de la fuente de alimentación.

El campo cruza la barrera de aire entre el estator y el rotor y origina el flujo de corrientes en los devanados del rotor. Esto produce una fuerza sobre el rotor debido a la corriente que interactúa con el cambio del campo magnético, y produce que el rotor gire. Como se puede observar en la Figura 1.1.

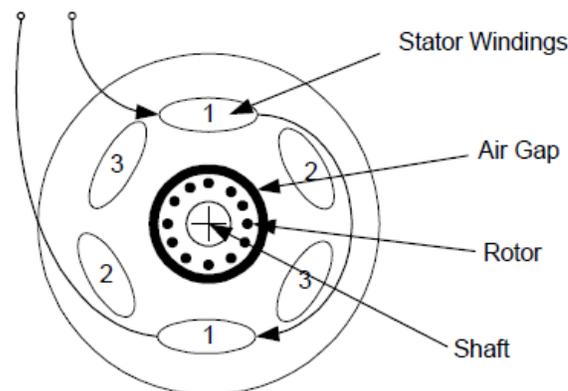


Figura 1.1
Principio de funcionamiento de un motor de inducción

Si los devanados son acoplados en pares (o polos), la frecuencia del campo magnético giratorio será menor que la frecuencia aplicada. Por ejemplo para dos polos y 60 Hz corresponderán 3600 rpm, pero para cuatro polos y 60 Hz serán 1800 rpm. De cualquier manera, si el rotor gira a la misma velocidad que el campo rotatorio, no habrá cambios en el campo magnético y por lo tanto no existirá

torque. Debido a esto el rotor siempre gira un poco más lento que el campo magnético giratorio para poder generar el torque. Esta diferencia de velocidad es conocida como deslizamiento.

Para el caso de motores de inducción, la velocidad se determina mediante la siguiente expresión:

$$Nm = \frac{120 \cdot f \cdot (1 - s)}{P} \quad \text{Ec. (1.1)}$$

Donde:

Nm = velocidad mecánica (rpm)
 f = frecuencia de alimentación (Hz)
 s = deslizamiento (adimensional)
 P = número de polos.

Como se puede observar la velocidad del motor depende de la frecuencia aplicada, así como del número de polos y un poco de la carga. Por lo que para controlar la velocidad del motor es necesario controlar la frecuencia de alimentación.

Si la frecuencia se reduce, el voltaje debe ser reducido o el flujo magnético será muy grande y el motor se saturará debido a esto el voltaje también debe ser controlado. Si la frecuencia es incrementada sobre la normal, se necesitaría más voltaje de lo normal para mantener el flujo máximo. Debido a que esto no es usualmente posible, el torque será menor a altas velocidades.

Por lo tanto para controlar la velocidad de un motor de CA estándar, se debe controlar la frecuencia y voltaje aplicados.

Para entender esto, recuérdese que el flujo en el núcleo de un motor de inducción se puede encontrar aplicando la ley de Faraday:

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{Ec. (1.2)}$$

Si se aplica un voltaje $v(t) = V_M \text{sen } \omega t$ al núcleo, el flujo ϕ resultante es:

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \frac{1}{N_p} \int v(t) dt = \frac{1}{N_p} \int V_M \text{sen } \omega t dt \\ \phi(t) &= -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t \quad \text{Ec. (1.3)} \end{aligned}$$

Nótese que la frecuencia eléctrica aparece en el denominador de esta expresión. Entonces, si la frecuencia eléctrica aplicada al estator disminuye en 10% mientras que la magnitud del voltaje aplicado al estator permanece constante, el flujo en el

núcleo del motor se incrementara cerca del 10%, al igual que la corriente de magnetización.

Para analizar el comportamiento de motores eléctricos comúnmente se utiliza las curvas de magnetización o las curvas de saturación. Las cuatro secciones principales de una curva típica de magnetización se muestran en la Figura 1.2.

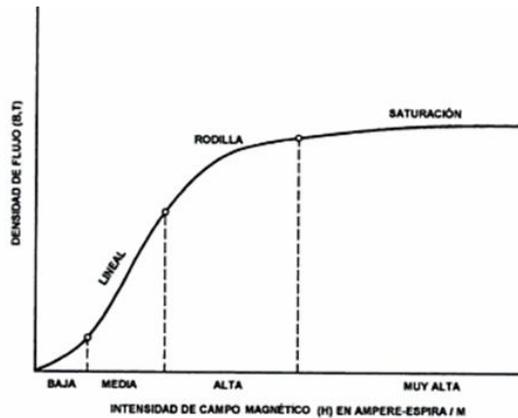


Figura 1.2

Curva de magnetización ilustrando las cuatro secciones principales.

La curva es cóncava hacia arriba para valores bajos de intensidad de campo magnético, muestra características lineales para valores medios de intensidad de campo y luego es cóncava hacia abajo para valores altos de intensidad de campo, eventualmente para muy altas intensidades es casi plano.

La parte de la curva que es cóncava hacia abajo se conoce como “la rodilla” de la curva y la sección casi plana es la región de saturación. La saturación magnética se completa cuando todos los dominios magnéticos del material están orientados en la dirección de la fuerza magnetomotriz aplicada. La saturación comienza al inicio de la región de la rodilla y se completa cuando la curva se comienza a aplanar.

Si bien es difícil controlar voltaje y frecuencia en altas potencias, el análisis costo-beneficio justifica el uso de sistemas de control de velocidad en motores de inducción estándar.

1.2 El inversor de frecuencia variable

Es un dispositivo electrónico que convierte corriente directa (CD) en corriente alterna (CA) es conocido como inversor. Los controladores electrónicos de velocidad para motores de CA usualmente convierten la alimentación de CA a CD mediante un rectificador y posteriormente convertir esta en una frecuencia variable, el voltaje de alimentación de CA variable usa un puente inversor para este fin. La conexión entre el rectificador y el inversor es llamado link de CD. El diagrama a bloques de un control de velocidad se muestra en la figura 1.3.

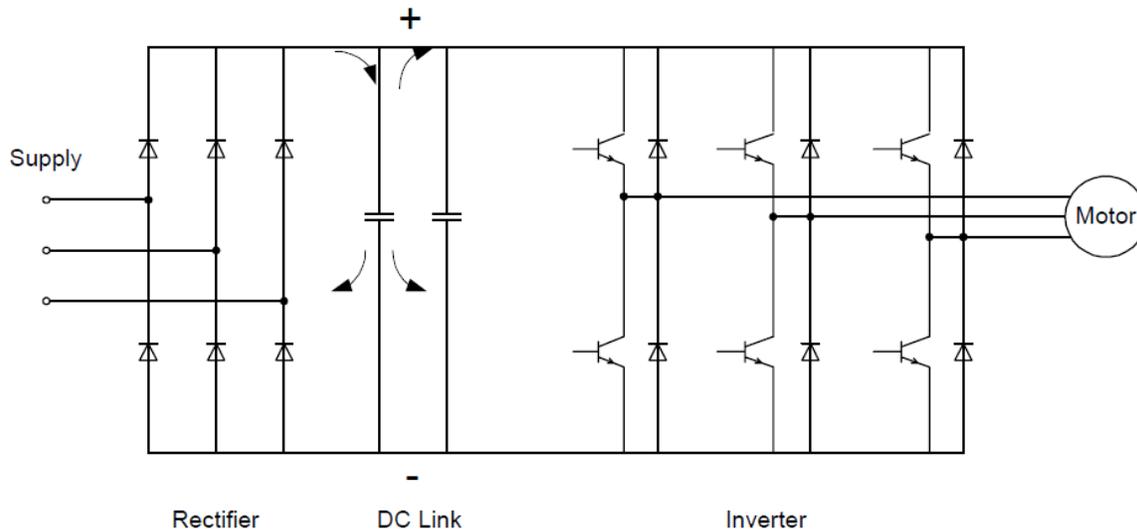


Figura 1.3
Diagrama a bloques de un control de velocidad

La fuente de alimentación puede ser monofásica o trifásica, mediante la cual se alimenta a un rectificador de onda completa y posteriormente a un bloque de capacitores de CD. La función de los capacitores es la de reducir el voltaje de rizo (especialmente en alimentaciones monofásicas) y suministrar energía en pequeñas variaciones de la voltaje de entrada. El voltaje en los capacitores no es controlable y depende de los picos del voltaje de alimentación de CA.

El voltaje de alimentación de CD es convertido nuevamente en voltaje de CA mediante un modulador por ancho de pulso PWM por sus siglas en ingles (Pulse Width Modulation). La forma de onda deseada es construida mediante la conmutación de los transistores de salida (transistores bipolares de compuerta aislada IGBTs) encendido y apagado crean una mezcla de frecuencia (la conmutación de frecuencia). Para variar el tiempo de encendido y apagado de los IGBTs se controla la corriente de alimentación, pero el voltaje de salida permanece como una onda de serie de pulsos cuadrados. Como se muestra en la figura 1.4.

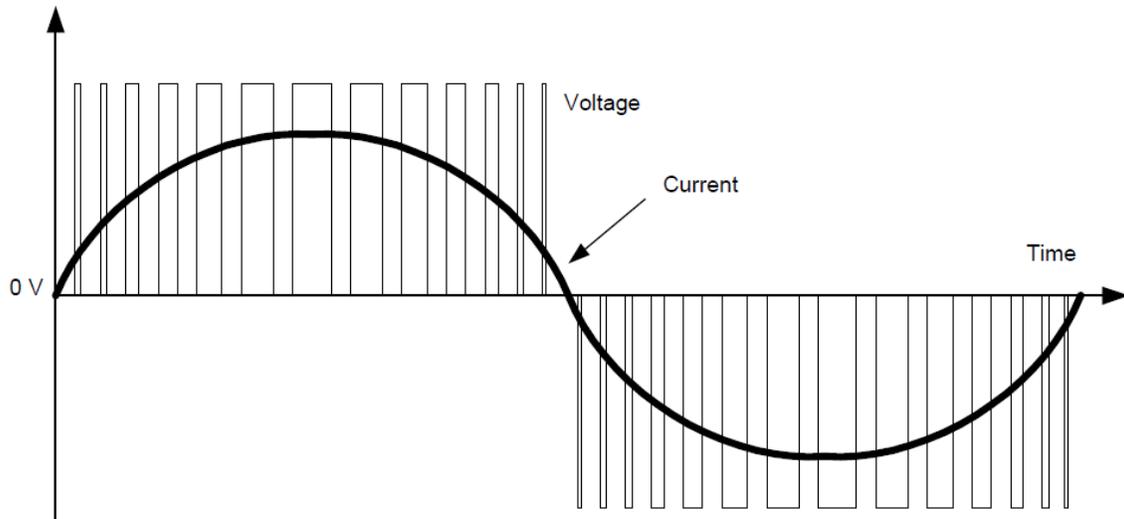


Figura 1.4
Inversor PWM

Hay muchos aspectos complejos en los inversores los cuales necesitan ser considerados durante el diseño:

- El sistema de control para calcular los requerimientos del modulador de ancho de pulso es muy complejo y especialmente diseñado con los circuitos integrados necesarios.
- Los controladores electrónicos son usualmente conectados al dispositivo de CD, el cual es conectado a la alimentación mediante la conexión del usuario, además de otros elementos como pantalla, led's indicadores, etc. Deben ser aislados seguramente de estos dispositivos.
- La corriente de salida debe ser cuidadosamente monitoreada para proteger el inversor y el motor durante la sobrecarga y corto circuito.
- En la primer variación de voltaje el modulo de capacitores de CD es descargado, y la corriente pico debe ser limitada, usualmente se usa un resistor, el cual es bypassed por un relevador después de unos cuantos segundos.
- Todas las conexiones para el inversor, especialmente las conexiones de control y alimentación, transportan mucha interferencia y deben de ser ajustadas con componentes de protección adecuados.
- Se necesita de una fuente de alimentación interna con diferentes voltajes de salida para alimentar los controles electrónicos.
- La salida de voltaje del PWM contiene muchos armónicos de frecuencia.

1.3 Métodos de control de velocidad

Existen algunos mecanismos para controlar la velocidad de un motor de inducción. Estos son:

Control por medio de voltaje del estator

En este tipo de control, el voltaje de alimentación del estator es controlado a la frecuencia de la línea mediante el control simétrico de los ángulos de disparo de las tres fases, por medio de tiristores en antiparalelo con línea conmutada como se muestra en la figura. 1.5. El voltaje del estator puede ser variado mediante pasos entre cero y el valor nominal dentro del rango de ángulos de disparo $0 < \alpha < 120^\circ$. Por su puesto la carga y la línea de alimentación contienen muchas armónicas a frecuencias integrales las cuales son generadas por el convertidor.

Debido a que el convertidor es muy simple, este medio de control es caracterizado por un desempeño pobre, este es usado en aplicaciones de bajas a medianas potencias. El flujo magnético es relativo a la relación del voltaje del estator y la frecuencia decrece conforme el voltaje lo hace. Por lo tanto, la magnitud de corriente incrementa para el mismo valor de torque cuando se reduce el voltaje resultando en una característica pobre de torque/amp.

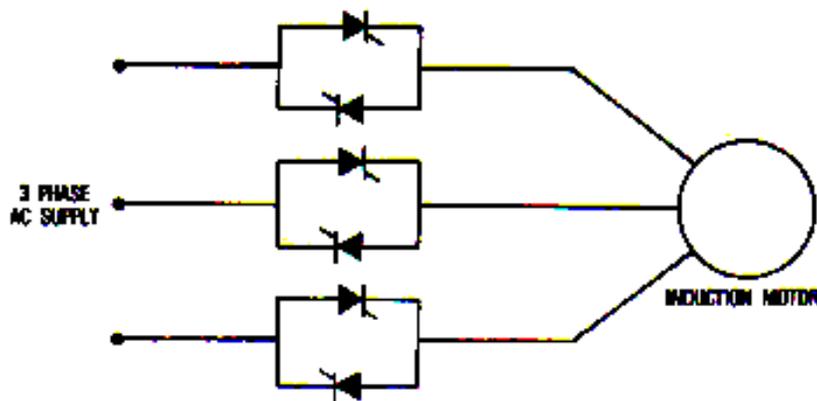


Figura 1.5
Control por medio del voltaje del estator

Inversores alimentados por voltaje onda cuadrada

El voltaje de alimentación de los inversores son generalmente clasificados en dos tipos: inversor de onda cuadrada e inversor modulado por ancho de pulso. Este tipo de inversores fue introducido al principio de 1960 cuando las técnicas elegantes de conmutación de potencia fueron introducidas. La figura 1.6 muestra el circuito de potencia convencional de un inversor de onda cuadrada. Un

rectificador de puente trifásico convierte el voltaje de CA en voltaje variable de CD, el cual alimenta la entrada de un puente inversor conmutador de potencia. El inversor genera un voltaje variable y frecuencia variable a la alimentación de potencia para controlar la velocidad del motor. El inversor es llamado alimentado por voltaje debido a que un gran filtro de capacitor proporciona un voltaje de alimentación al inversor y por lo tanto las ondas de salida de voltaje del inversor no son afectadas por la naturaleza de la carga. Los dispositivos alimentados por voltaje de onda cuadrada son normalmente usados en bajas a medianas potencias donde la relación de velocidad esta usualmente limitada a 10:1. Este tipo de unidades han sido ampliamente superadas por los dispositivos PWM.

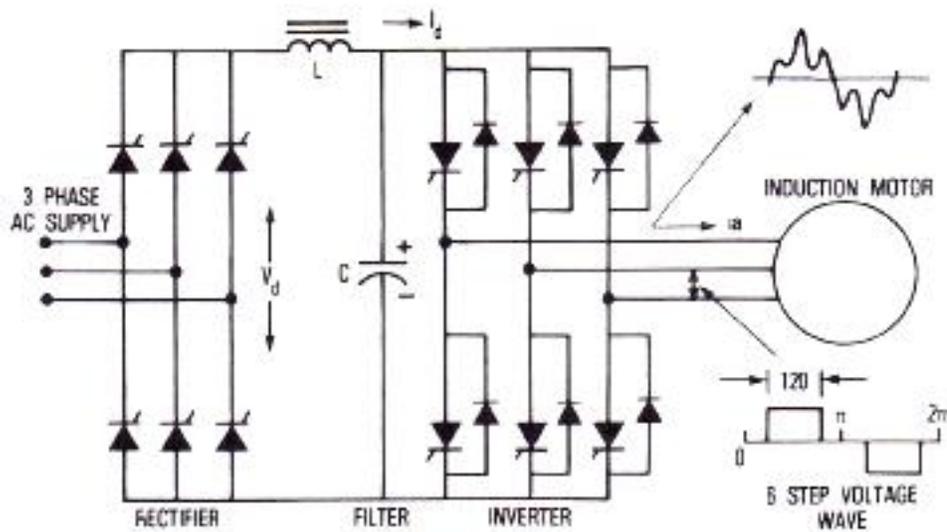


Figura 1.6
Circuito convencional de un inversor de onda cuadrada

Dispositivos inversores PWM

En este método, los tiristores son conmutados en encendido y apagado muchas veces dentro de un medio ciclo para generar una salida de voltaje variable la cual es normalmente baja en contenido de armónicas. En este método no se crean ángulos predeterminados de la onda cuadrada lo cual permite el control del voltaje con la eliminación de las armónicas seleccionadas.

1.4 Como seleccionar un variador de velocidad

Comúnmente la selección de un variador de velocidad se realiza cuando el motor ya se encuentra instalado y el rango de velocidad no debe ser excedido. De cualquier manera cuando se selecciona un dispositivo por primera vez, se deben hacer consideraciones cuidadosas para evitar problemas en la instalación y operación además de disminuir significativamente el costo.

Consideración que se deben tener en cuenta:

- Se deben checar los valores de corriente del inversor y el motor. Los valores de potencia solo son un primer índice.
- Se debe checar el rango de velocidad que se requiere. Para operaciones por encima de la frecuencia de alimentación normal 60 Hz, usualmente solo es posible con un reductor de potencia. En operaciones a baja frecuencia y alto torque pueden ocasionar que el motor se sobre caliente debido a la falta de ventilación.
- Se debe checar el comportamiento de la sobrecarga. Los inversores limitan la corriente al 150 o 200 % de la corriente plena muy rápidamente. Los motores estándar de velocidad variable soportan estas sobrecargas.
- ¿Se necesita un paro rápido? Si es así, se debe considerar usar una resistencia de frenado para absorber la energía excedente. Algunos VSDs pueden requerir unidades independientes de frenado.
- ¿Se requiere operar con cables de una longitud mayor a 50 m, o cables cubiertos o blindados de una longitud mayor a 25 m.? Si es así, puede ser necesaria una inductancia para la capacitancia del cable.

1.5 Limitantes de los motores

La velocidad del motor es determinada principalmente por la frecuencia aplicada. El motor se retrasa un poco conforme la carga incrementa y el deslizamiento aumenta. Si la carga es muy grande el motor excederá el torque máximo provocando un retraso o desenganche. La mayoría de los motores e inversores operan al 150% de la carga por un corto tiempo, (60 segundos en un instante).

Los motores son usualmente enfriados mediante un ventilador que gira a la velocidad del motor. Estos ventiladores están diseñados para enfriar el motor a plena carga y una velocidad base. Si el motor opera a una frecuencia menor y a un torque pleno, se generaran altas corrientes y el enfriamiento puede ser inadecuado. Los fabricantes de motores proporcionan la información necesaria de valores límites, pero una curva típica de valores límite, limita el torque máximo a un 75% a una frecuencia que tiende a cero a plena capacidad del 50% de la velocidad de operación. Ver la figura 1.7. Se debe asegurar que las limitaciones no sean excedidas por tiempos largos de operación.

Para seleccionar la protección del motor se puede utilizar la función I^2t . En la cual los parámetros pueden ser calculados en base a la temperatura del motor o se puede considerar usar un motor con una protección como un PTC.

Muchos motores en el mercado se encuentran disponibles con PTC (por sus siglas en inglés Positive Temperature Coefficient) el cual es un resistor instalado dentro de los devanados. La resistencia del PTC alcanza rápidamente una temperatura en particular, y este cambio puede ser detectado por el inversor. Las terminales de entrada del inversor pueden ser configuradas para aceptar una señal del PTC y parar al inversor en caso de una sobrecarga.

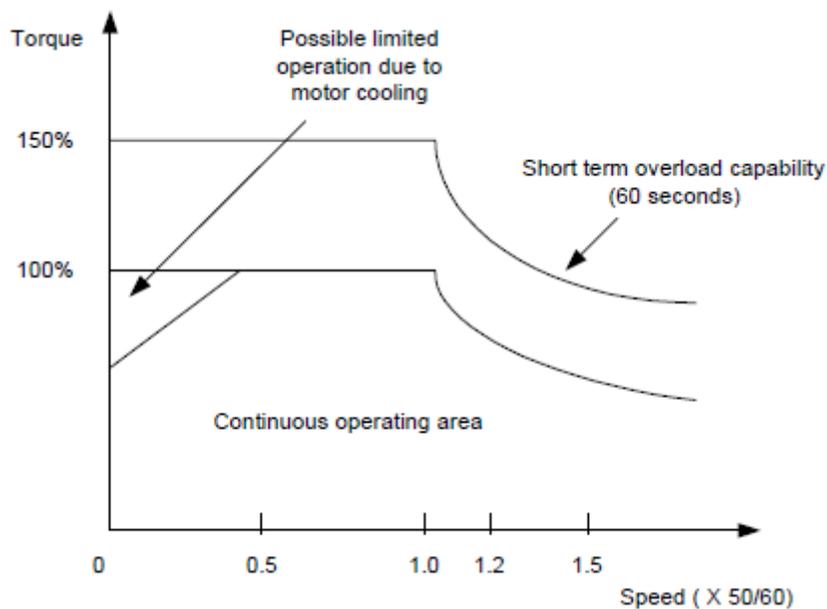


Figura 1.7
Capacidades de operación de combinaciones Motor/Inversor

1.6 Consideraciones en la carga

Los parámetros de un inversor y un motor son determinados por el rango de velocidades y la demanda de torque de la carga. La relación entre velocidad y torque es diferente para cada carga. Muchas cargas pueden considerar un torque constante. Esto es que el torque se mantenga en un rango de velocidades.

Aplicaciones con torque variable

Algunas cargas tienen características de torque variable. Esto es, que el torque se incrementa con la velocidad. Algunas cargas típicas de torque variable son las

bombas centrífugas y ventiladores. En este tipo de aplicaciones la carga es proporcional al cuadrado de la velocidad, y por lo tanto la potencia es proporcional al cubo de la velocidad, como se observa en la Figura 1.8. Esto significa que al reducir la velocidad se obtendrá una gran reducción en la potencia y por lo tanto en ahorro de energía. Por ejemplo un 10% en la reducción de la velocidad generara teóricamente una reducción del 35% en la potencia.

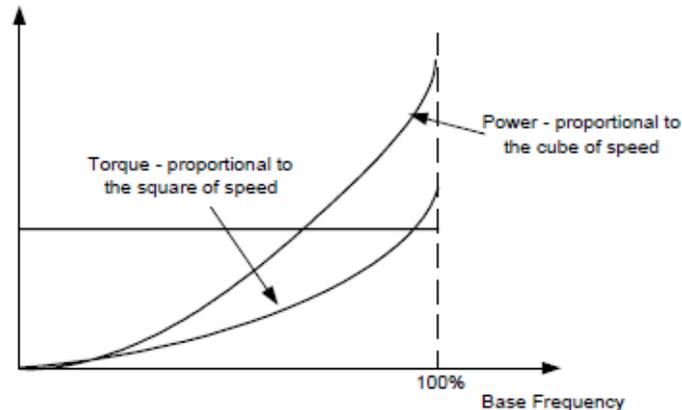


Figura 1.8
Características Torque/Carga Variable.

1.7 Protección de variadores de velocidad y motores

La protección de los VSD incluye la protección de sus dos mayores componentes los cuales son:

- El convertidor de AC
- El motor eléctrico

En los modernos dispositivos de velocidad variable de CA, la mayoría de los elementos de protección son implementados electrónicamente dentro del sistema de control del convertidor de CA. De tal manera que para tener un sistema de protección eficiente son necesarios sensores externos para monitorear directamente la corriente y la temperatura. La temperatura que se puede alcanzar en el motor y el convertidor son la principal causa de daño. La causa de que la temperatura se eleve es usualmente resultado del flujo de alta corriente, el censo de corriente es un método común de implementar protecciones de corto circuito y sobrecarga.

Las protecciones convenientes del circuito convertidor de AC pueden ser las siguientes:

- Interruptor de caja moldeada. Para proporcionar la velocidad adecuada, estos necesitan ser del tipo de corriente limitante.
- Fusibles de alta capacidad de ruptura. Estos fusibles proporcionan parte del aislamiento del interruptor, el cual usualmente proporciona seguridad de aislamiento. El tipo de fusible depende de la longitud del conductor de alimentación y la inductancia del mismo.

En el lado de la salida, un moderno y bien diseñado VSD se protegerá a sí mismo de todas las fallas comunes del motor, tales como un corto circuito, falla a tierra, sobrecarga térmica, etc. Los VSDs usualmente también proporcionan protección contra sobrecarga térmica del motor.

Las siguientes características de protección son usualmente disponibles en la mayoría de los convertidores de AC digitales.

- Protección para bajo voltaje y sobre voltaje de entrada de CA.
- Protección para bajo voltaje y sobre voltaje de CD.
- Protección para sobre corriente de salida (corto circuito).
- Protección para falla a tierra de salida.
- Protección para sobre temperatura.
- Protección térmica para sobrecarga del motor.

Protección para bajo voltaje de AC y DC

Las protecciones de bajo voltaje del sistema monitorean el voltaje de llegada de las tres fases al igual que el voltaje de CD y responde a varias fallas como pérdida de fase.

Si el voltaje de alimentación cae a niveles bajos como resultado de una falla del sistema, es poco probable que el convertidor se dañe. Los diodos rectificadores de entrada pueden operar a cualquier voltaje entre cero (teóricamente) y el voltaje de operación. Por lo tanto, un bajo voltaje de alimentación no es realmente un problema para el circuito de potencia.

Las protecciones de bajo voltaje son principalmente requeridas para asegurar que todas las fuentes de alimentación estén operando con las especificaciones requeridas. Si una unidad de alimentación perdiera el voltaje de regulación de salida, podría ocurrir lo siguiente:

- El microprocesador podría caer en un estado indeterminado.
- El circuito principal podría perder voltaje y corriente para asegurar el encendido y apagado de los dispositivos de conmutación.
- Si se tiene una corriente insuficiente de encendido, el dispositivo de potencia puede caer en saturación, y amenaza con operar en la región lineal y las pérdidas se incrementarían.

Protección para altos voltajes de AC y CD

Finalmente todos los componentes fallan cuando son expuestos a sobre voltajes lo suficientemente altos. En un variador de velocidad, el sobre voltaje puede ocurrir por las siguientes razones:

- Altos voltajes en la fuente de alimentación principal
- Altos voltajes generados por la conexión del motor, que se comporta como un generador cuando se trata de reducir la velocidad de una carga de alta inercia muy rápidamente.

Protección contra sobre corriente de salida

El propósito de las protecciones de sobre corriente es eliminar la falla de los semiconductores de potencia (IGBTs, BJTs, MOSFETs, GTOs, etc) durante el cortocircuito de fase a fase del lado del motor. Los fusibles no son apropiados para la mayoría de conmutadores de potencia debido a su característica I^2t .

El método más efectivo de protección es interrumpir todos los interruptores tipo inverso cuando la corriente alcanza algún valor superior al punto de operación. El nivel de protección depende de las características de operación del área. La corriente máxima de falla es usualmente determinada con el valor máximo de operación de la unidad. Un valor típico es que la corriente máxima es alrededor del 200% de la corriente de operación, con corriente limitadora al 150% o algunas veces al 180%.

Protección para falla a tierra de salida.

Una protección para falla a tierra está diseñada para detectar un cortocircuito entre una fase y tierra e inmediatamente apagar el convertidor. Esta protección no es generalmente diseñada para protección de la vida humana en caso de una descarga eléctrica.

Una protección de falla a tierra es usualmente implementada mediante un transformador de núcleo de corriente balanceada; el cual está construido por medio de un núcleo magnético toroidal a través del cual pasan los cables del bus de CD o los cables de fase del motor. El circuito de protección es conectado a un devanado de baja corriente que se encuentra alrededor del toroide. Si la suma vectorial de las corrientes que pasan por el núcleo suman cero, el flujo en el núcleo es cero. Un flujo cero se presenta en condiciones normales de operación.

Si ocurre una falla a tierra, la suma de corrientes a través del núcleo del transformador no será cero y existirá un flujo en el núcleo como se muestra en la figura 1.9.

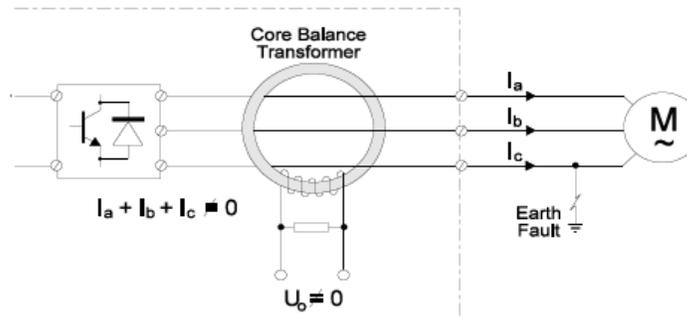


Figura 1.9

Transformador de corriente núcleo balanceado para protección contra falla a tierra.

El flujo generado en el núcleo inducirá una corriente en el devanado secundario de protección, el cual convertirá la corriente en un voltaje mediante un resistor. Un circuito comparador detectará la falla y apagará todas las unidades de potencia. El nivel típico de protección es de 5 Amperes.

Se debe tener cuidado en establecer el punto de disparo del circuito de falla a tierra. En todos los VSDs, algunas corrientes de fuga siempre toman dirección hacia tierra debido a las componentes de alta frecuencia de las ondas de corriente del motor y la capacitancia de los cables a tierra del motor. Altas corrientes de fuga pueden ocasionar molestos disparos de las protecciones de falla a tierra.

Protecciones para sobre temperatura

Las protecciones para sobre temperatura cumplen la función de prevenir sobrecalentamiento de varios componentes en el VSD, particularmente de los semiconductores, los cuales están limitados a una temperatura máxima de 150° C. Para asegurar que este límite no sea alcanzado las protecciones se mantienen operando a temperaturas por debajo de 80 – 90° C, dependiendo del diseño.

Las protecciones pueden consistir en un simple interruptor de temperatura bimetálico (micro termistores), los cuales operan a una temperatura específica, aunque los dispositivos más modernos usan sensores de temperatura de uniones de silicio, para retroalimentar la temperatura actual del microprocesador, mediante este método el procesador puede emitir señales de alerta, antes de apagar el VSD o bien tomar acciones correctivas como reducir la velocidad del motor o reducir la frecuencia de conmutación del PWM.

Sobretodo protección y diagnostico

En la figura 1.10 se muestra el diagrama a bloques de las características de protección comúnmente usadas en un VSD. Muchas de las funciones de protección son implementadas mediante software, utilizando un algoritmo conveniente. Pero las principales excepciones son las protecciones contra sobre corriente y falla a tierra, las cuales son implementadas mediante dispositivos físicos para asegurar una protección rápida y adecuada.

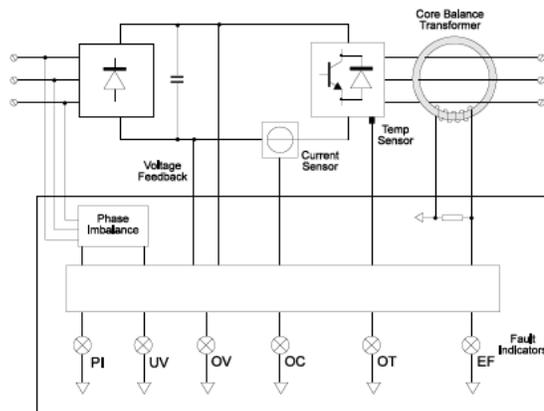


Figura 1.10
Diagrama a bloques de protección de un VSD

Técnicas de optimización de energía u “optimización de flujo”

Una de las características de los VSDs es que pueden ahorrar energía mediante la reducción de la corriente de magnetización del motor a bajas cargas mecánicas. El principio es que a bajas cargas, el motor no necesita producir un gran campo magnético para producir torque.

1.8 Ahorro de energía mediante los variadores de velocidad

En el mercado mundial hay más de 120 marcas de variadores de velocidad, en resumen se puede decir que todos son muy buenos, pero no todos contribuyen de manera eficiente con el ahorro energético, para entender si existe ahorro de energía o no primero debemos entender conceptos tales como los armónicos y el factor de potencia.

Armónicos

Los armónicos son distorsiones de las ondas senoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal. La aparición de corrientes y/o tensiones armónicas en el sistema eléctrico crea problemas tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros.

En términos de eficiencia energética es una energía que se paga pero que no se utiliza. Si el porcentaje de armónicos es alto sus pérdidas son mayores; por ejemplo:

Un motor de 40 HP, 460V trabaja a su máxima potencia y es manejado por un variador de velocidad de la misma potencia, y puntualmente registró una corriente Irms verdadera de 45 Amp y una distorsión total de armónicos de corriente del 25% de THID (Distorsión total de armónicos de corriente). Al respecto se desprende lo siguiente:

- Corriente Irms verdadera de 45 Amp
- Corriente de régimen o de trabajo verdadero del motor = 33,75 Amp
- Corriente generada por los armónicos es = 11,25 Amp

La corriente puntual que requiere el motor para trabajar es 33,75 Amp, los otros 11,25 Amp, es una energía que se consume por causa de los armónicos, pero que no está siendo utilizada. Si el nivel de armónicos es alto, mayores son las pérdidas energéticas, las cuales son aún más grandes cuando se trabajan a mayores potencias.

Todos los convertidores electrónicos de potencia empleados en distintos tipos de sistemas electrónicos pueden aumentar las perturbaciones por armónicos introduciendo intensidades de armónicos directamente hacia la red. La Figura 1.11 muestra cómo los armónicos en intensidad (i_h) en la intensidad de entrada (i_s) de un convertidor electrónico de potencia afectan a la tensión de alimentación (u_t).

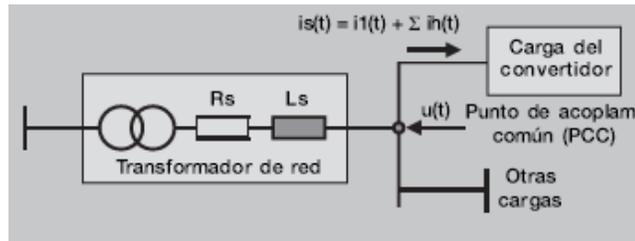


Figura1.11 Planta con carga del convertidor, transformador de red y otras cargas

La intensidad de red de un rectificador puede calcularse a partir de la intensidad de salida directa mediante la fórmula siguiente.

$$I_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} * I_d$$

I_1 = La intensidad de red fundamental

I_d = Salida de intensidad directa del rectificador

En un caso teórico en el que la intensidad de salida puede estimarse como intensidad de cc limpia, las frecuencias de intensidad de armónicos de un rectificador trifásico de 6 pulsos es n veces la frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz). Los números de orden n se calculan con la fórmula siguiente:

$$n = 6k + 1, \text{ donde } k = 1, 2, 3, \dots$$

Los valores eficaces de los componentes armónicos son:

$$I_{ni} = \frac{I_1}{n}$$

y los componentes armónicos son los que se muestran en la figura 1.12

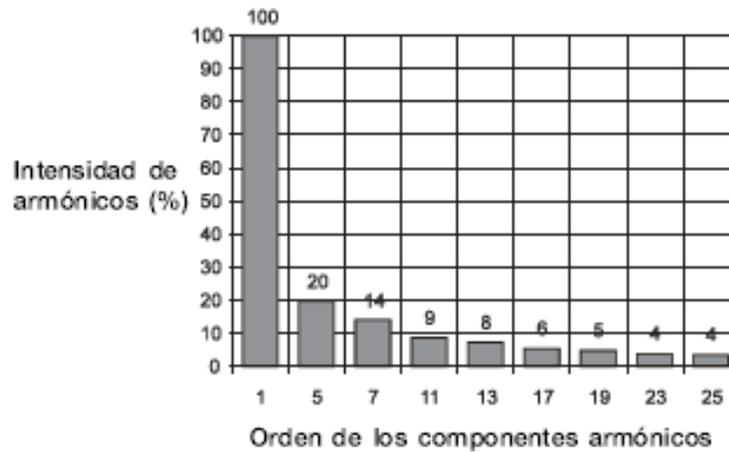


Figura 1.12 Contenido de armónicos en la intensidad rectangular de un rectificador de 6 pulsos.

El principio del modo en el que los componentes armónicos se suman a la intensidad fundamental se muestra en la Figura 1.13, en la que solamente se muestra el quinto armónico.

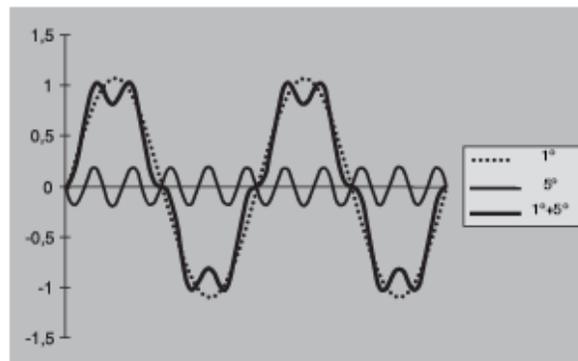


Figura 1.13 La intensidad total como la suma de la fundamental y el quinto armónico

Relación entre los armónicos y el factor de potencia cuando se utiliza un variador de velocidad

Hay dos clases de factor de potencia que a menudo no son definidos.

Desplazamiento de Factor de Potencia (DPF). El DPF es muy cerca de la unidad (uno en un variador de velocidad, y no es influenciado por la generación de armónicos de corriente. Es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente (P/S) y solo se define para voltajes y corrientes sinusoidales.

El Verdadero Factor de Potencia (TPF) es una relación entre el DPF y la Corriente de Armónicos Generada por la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{DPF}{\sqrt{1+THCD^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{1+THCD^2}}$$

Ec. 1.4

Un factor de potencia elevado, indica que los distintos armónicos son bajos, por consiguiente las pérdidas son pequeñas y el ahorro energético es mayor.

1.9 Variadores de velocidad de tecnología estándar o básica

Los variadores de velocidad de tecnología estándar o básica, realmente no ahorran energía eléctrica, estas configuraciones son muy pobres en la mitigación de los niveles de armónicos y poco contribuyen al ahorro energético. Un variador de velocidad con esta tecnología en la práctica puede tener una distorsión total de armónicos de corriente que van desde un 40% THID hasta un 80% THID.

Variadores de velocidad que tienen bobinas en el circuito intermedio o usan reactancias de línea

La implementación de bobinas o reactancias de línea contribuyen a mitigar el nivel de los armónicos de corriente, al atenuarlos se reducen las pérdidas energéticas. Igualmente es importante conocer que hay variadores de velocidad que utilizan reactancias de línea dentro del mismo gabinete, igualmente sucede con otros fabricantes que utilizan bobinas de CD en el circuito intermedio y están dentro del mismo gabinete; pero también hay opciones para instalar las reactancias de línea fuera del gabinete del variador de velocidad.

El ahorro energético de estas reactancias o bobinas radica en el nivel de mitigación de los armónicos de corriente y este porcentaje está ligado con la impedancia de las mismas. Para las reactancias de línea su efecto de reducción del nivel de armónicos está entre el 2% y el 3%, y para el caso de las bobinas en el circuito intermedio su efecto mitigador es el doble; por consiguiente un variador de velocidad que implemente esta tecnología, mitiga los niveles de armónicos de corriente entre un 22% THID hasta un 42% THID.

Es importante manifestar que estas reactancias o bobinas ayudan a proteger el variador de velocidad contra las sobretensiones a frecuencia comercial, mejoran el ruido (el riple) del voltaje del circuito intermedio, y finalmente contribuyen a la reducción de los niveles de armónicos de corriente.

Variadores de velocidad de tecnología estándar o básica que implementan filtros de armónicos matrices en línea

La implementación de filtros de armónicos matrices en línea permite que si exista ahorro de energía eléctrica debido a que estos filtros de línea mitigan los niveles de los armónicos de corriente entre un 5% THID y un 10% THID, además contribuyen de manera amigable con las formas de onda de corriente y voltaje haciéndolas lo mas seno posible.

1.10 Variadores de velocidad de tecnología especial de 12, 18 o más pulsos

Las configuraciones de esta clase de variadores hacen que los armónicos de corriente se mitiguen a niveles muy bajos contribuyendo al ahorro energético del sistema. En la práctica se pueden observar lecturas entre un 3% de THID y un 8% de THID. Igualmente su atenuación del nivel de armónicos se ve afectado cuando se trabajan con cargas regenerativas, haciendo que estos niveles oscilen y se alejen de un nivel esperado.

Estos variadores de velocidad para que su tecnología sea eficiente y maneje niveles muy bajos de armónicos de corriente, requieren que el voltaje de alimentación de la red no presente desbalance entre sus fases, si esta situación se da, la eficiencia respecto al nivel de atenuación de armónicos se hace menos eficiente y prácticamente esta tecnología se comportaría como una tecnología estándar pero siendo un variador de velocidad de un elevado costo de inversión, en otras palabras, los variadores de velocidad de 12 pulsos o más pulsos pierden su desempeño cuando su alimentación principal presenta desbalance de voltaje, haciendo que su diseño teórico de reducción de armónicos se haga menos eficiente, como se puede observar en la figura 1.14, 1.15 y 1.16 de datos basados en la práctica.

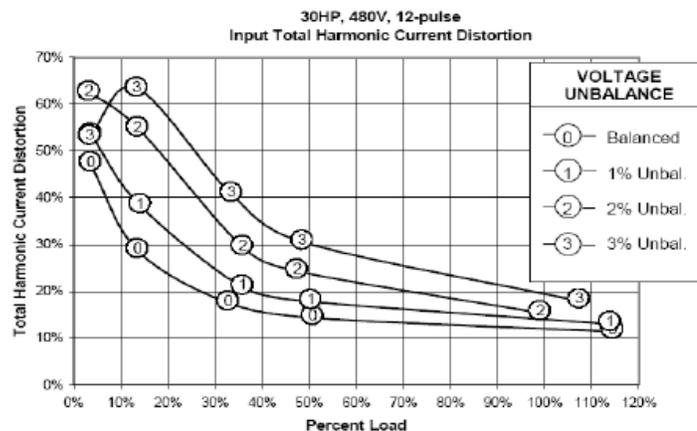


Figura 1.14

Grafica de porcentaje de carga versus distorsión de la corriente en variador de velocidad de 12 pulsos.

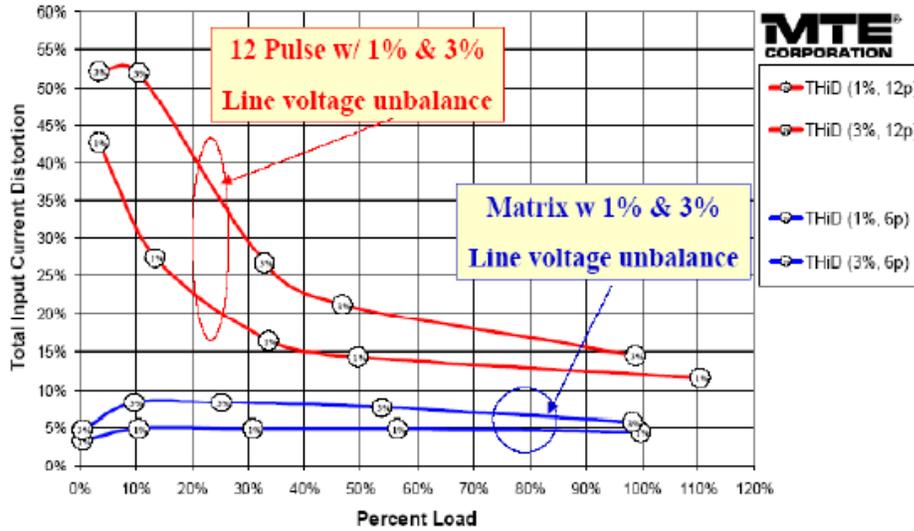


Figura 1.15

Grafica comparativa (% carga – THID) de variador 12 pulsos y básico con filtro de armónicos matriz en línea con voltaje desbalanceado.

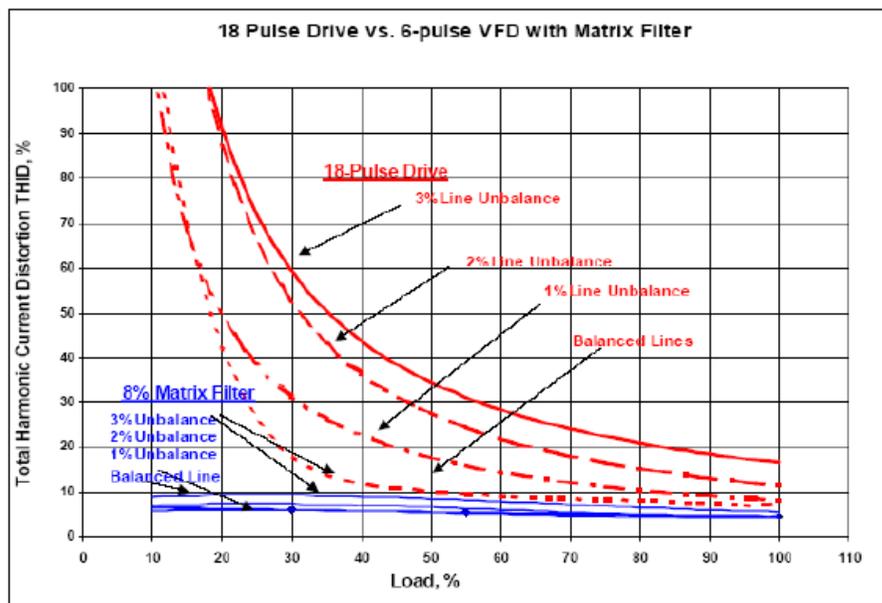


Figura 1.16

Grafica comparativa (% carga – THID) de variador 18 pulsos y básico con filtro de armónicos matriz en línea con voltaje desbalanceado.

CAPITULO 2

SISTEMA DE BOMBEO

Una correcta discusión de un equipo de bombeo no solo considera la bomba, sino el sistema completo de bombeo y cómo interactúan estos componentes. Los sistemas recomendados aprovechan la evaluación y análisis incluyendo ambos la alimentación y demanda del sistema.

2.1 Características Hidráulicas de un Sistema de Bombeo

En un sistema de bombeo, el objetivo es transferir un líquido de una fuente a un destino requerido. La presión necesaria para hacer que un líquido fluya a una velocidad requerida debe ser capaz de sobreponerse a las pérdidas en el sistema denominada comúnmente carga dinámica total. Las pérdidas son de dos tipos: cargas estáticas y cargas por fricción.

Carga

Es el contenido de energía mecánica que requiere la bomba para mover el agua desde el nivel dinámico hasta el punto final.

Carga estática

La carga estática de descarga es la diferencia en elevación entre el nivel del líquido de descarga y la línea de centros de la bomba. Si la carga estática de succión tiene valor negativo porque el nivel del líquido para succión está debajo de la línea de centros de la bomba, se le suele llamar "altura estática de aspiración". Si el nivel de líquido de succión o de descarga está sometido a una presión que no sea la atmosférica, ésta se puede considerar como parte de la carga estática o como una adición por separado a la carga estática.

Carga por fricción

Carga por fricción (algunas veces llamada perdida por carga dinámica), es la pérdida por fricción en el líquido que será desplazado, en tuberías, válvulas, y otros equipos en el sistema. Esta pérdida es proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo.

2.2 Definición y clasificación de las bombas

Bomba es una máquina que absorbe energía mecánica y restituye al líquido que la atraviesa energía hidráulica.

Las bombas se pueden clasificar en dos categorías principales:

Bombas rotodinámicas.

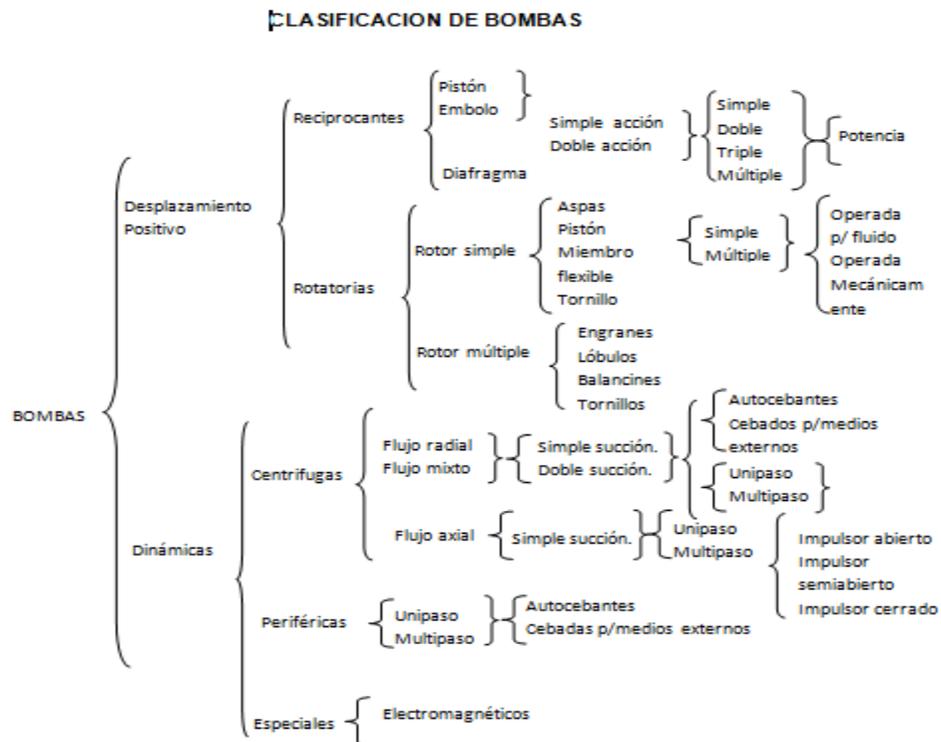
Se llaman rotodinámicas por que su movimiento es rotativo y la dinámica de la corriente juega un papel esencial en la transmisión de la energía, su órgano transmisor de energía se llama rodete.

Su funcionamiento se basa en la ecuación de Euler.

Bombas de desplazamiento positivo

A este grupo pertenecen las bombas alternativas y las rotativas llamadas rotoestáticas, por que no son rotativas, pero en ellas la dinámica de la corriente no juega un papel esencial en la transmisión de la energía.

Su funcionamiento se basa en el principio de funcionamiento de desplazamiento positivo.



Para el caso que nos ocupa de riego agrícola hablaremos de bombas vertical tipo turbina con motor externo eléctrico vertical, la cual es un diseño específico de bomba centrífuga que opera con el eje de rotación vertical y parcialmente sumergida en el fluido que se maneja

2.3 Bomba vertical tipo turbina

Es frecuente que el bombeo del fluido de un tanque se realice de mejor modo por medio de una bomba vertical de turbina, como la que se presenta en la figura 2.1. La bomba se monta directamente sobre el tanque, en una brida soportando la carga producida por la descarga de agua, donde está conectada la tubería de salida. En el extremo inferior de una tubería pesada que se extiende al tanque están montados impulsores múltiples en serie. El impulsor inferior lleva fluido a la boquilla de succión y lo mueve hacia arriba al impulsor siguiente. Cada etapa incrementa la capacidad de carga de la bomba. Los impulsores se mueven por medio de un eje conectado a un motor eléctrico que se halla sobre la unidad. Rodamientos guían al eje en cada impulsor, a la carga de descarga, y a puntos intermedios para ejes largos. Se pone cuidado especial para evitar fugas del producto hacia el ambiente.

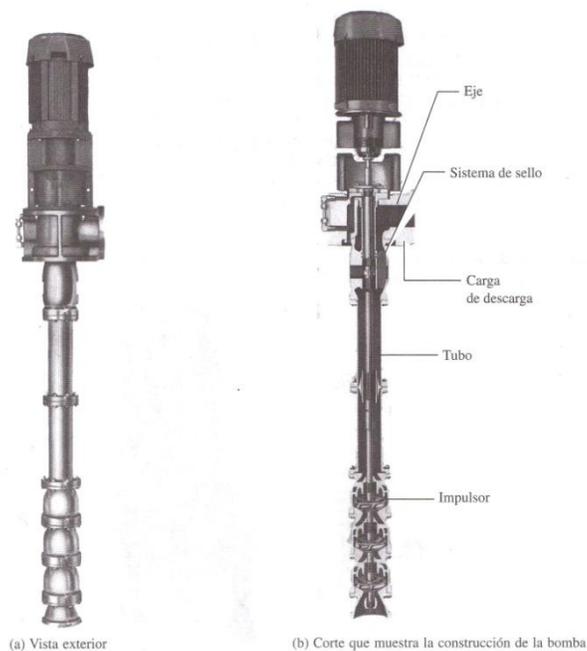


Figura 2.1
Bomba vertical de turbina

Las bombas turbinas verticales pueden ser lubricadas por aceite o por agua; cuando se tienen chumaceras lubricadas con aceite se usa un tubo de cubierta de flecha. En el caso de que sean lubricadas por agua el líquido manejado por la bomba sirve como lubricante, en estas no se necesita cubre flecha, por lo que se conocen como bomba de flecha descubierta. Las bombas turbinas verticales pueden ser movidas por motores eléctricos, turbinas de vapor o maquinas de gasolina o diesel.

Las bombas lubricadas por agua se usan cuando se requiere agua absolutamente libre de aceite o cuando algunos cuerpos reguladores deciden que hay una probabilidad remota que el aceite que se usa para lubricación pueda contaminar el agua bombeada.

Ensamble de tazones de turbina

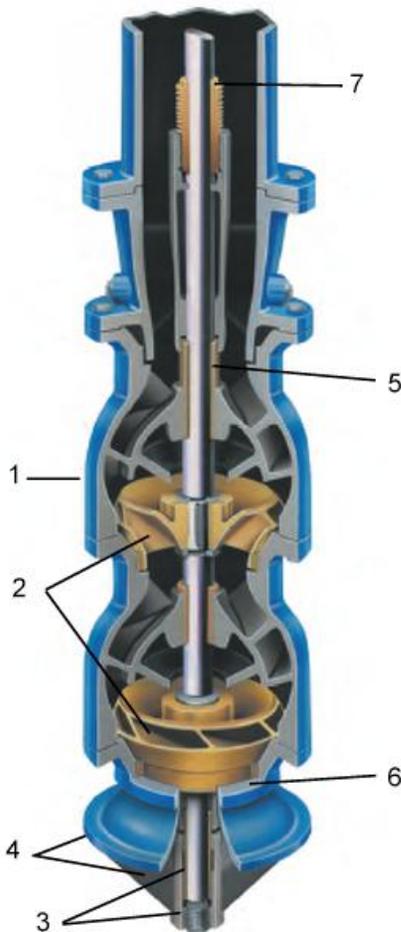


Figura 2.2 Tazones de bomba tipo turbina

1. Los tazones son fabricados con hierro vaciado de alta calidad para trabajo pesado con una resistencia mínima a la tensión de 30,000 PSI, con superficies de paso de líquido lisas diseñados para operación eficiente.

Disponibilidad opcional de superficies de paso recubierta para mejorar la eficiencia de la bomba. El ensamble de los tazones puede ser en etapas para producir presiones más altas para una capacidad dada.

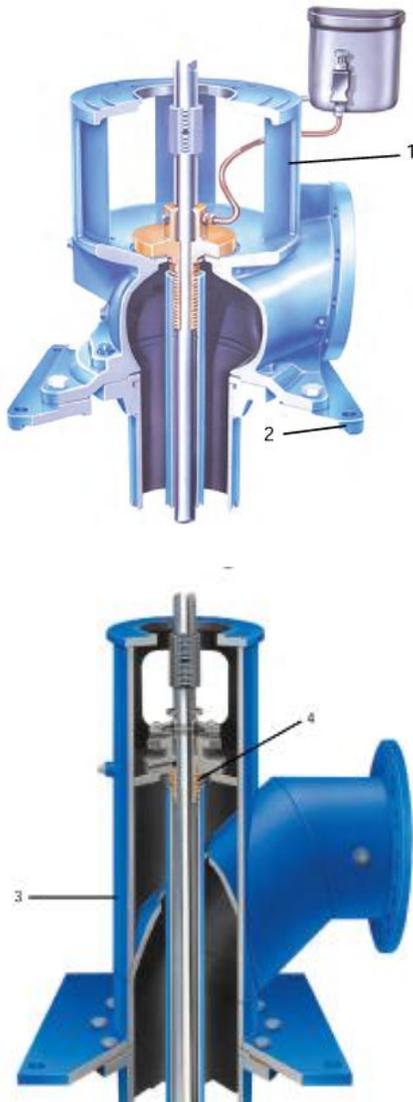
2. Los impulsores cerrados son calibrados para los tazones de la bomba. Los impulsores fundidos a precisión son balanceados dinámicamente para evitar la vibración. Los impulsores son asegurados al eje con manguitos cónicos. En unidades de mayor tamaño, se usa un collar y cuña para asegurar el impulsor a la flecha. Una tuerca de ajuste superior de la flecha o acoplamiento ajustable facilitan el ajuste de la tolerancia entre los impulsores y los tazones.

3. Para asegurar una larga vida, la chumacera de succión es empacada con grasa y protegida con un collar contra arena para evitar la entrada de arenillas y abrasivos

4. La campana de succión de hierro fundido y sus aletas guía de hierro fundido integral proporcionan un flujo uniforme hacia el impulsor de la primera etapa. Esto reduce la formación de vórtices y contribuye a una operación eficiente.

5. Las chumaceras de tazón son lubricadas con el líquido bombeado y aseguran la alineación precisa de la flecha.
6. Hay disponibilidad de anillos de desgaste para impulsores y tazones como opción para recuperar las tolerancias de los impulsores cuando no es posible hacer más ajustes externos. Estos anillos renovables permiten al propietario restaurar una unidad gastada e ineficiente casi a su condición original, extendiendo su operación muchos años.
7. Donde se usa una flecha encapsulada, las chumaceras de conexión son lubricadas con agua, aceite o grasa, dependiendo del lubricante usado en el tubo de cubierta.

Cabezales de descarga



1. Los robustos cabezales de descarga de hierro fundido cumplen los requisitos sanitarios soportan la columna, la flecha y el ensamble de tazones, y además aceptan cualquier motor vertical. Grandes puertos de inspección facilitan el acceso al prensaestopas o sello mecánico y los pasos de líquido lisos aseguran menos pérdidas por fricción y mejor eficiencia general. La descarga con brida fundida integralmente puede ser diseñada para 125 lb. ó 250 lb.
2. Tenemos disponibles placas de base de hierro fundido o acero para el montaje de los cabezales de descarga. Una vez que la placa de de base está nivelada y calafateada en su lugar, la bomba puede ser removida fácilmente para mantenimiento y reinstalada sin volver a alinear.
3. Se dispone también de cabezales de descarga fabricados con placa de acero de alta calidad, con la descarga para brida o extremo liso. El diseño de descarga mediante brida va hasta 300 lbs. El diseño del codo de tres segmentos da uniformidad al flujo de fluido y reduce las pérdidas por fricción, para operación eficiente.

Figura 2.3 Cabezales de Descarga

4. El arreglo de lubricación con agua limpia utiliza prensaestopas o sello mecánico para sellar la flecha. En el sello mecánico o prensaestopas se canaliza una fuente exterior de agua que fluye a través de la cubierta de la flecha para lubricar las chumaceras. Un casquillo renovable protege la flecha hasta el área del prensaestopas.

5. Todos los diseños de los cabezales de descarga son adaptables a columnas roscadas o con brida.

2.4 Leyes de afinidad y curvas de capacidades nominales

El rendimiento hidráulico de una bomba centrífuga incluye tres factores básicos:

1) La capacidad expresada en unidad de volumen por unidad de tiempo, como lps o en unidades inglesa gpm, comúnmente las graficas de fabricante proporcionan los valores en unidades Inglesas.

2) La carga total expresada en metros o pies del líquido que se bombea

3) La velocidad a la cual funciona la bomba en rpm.

El rendimiento o “comportamiento” de la bomba se presenta en forma de curvas en que la curva de carga contra capacidad se traza a una velocidad fija. La curva también indica el caballaje al freno requerido con diversos flujos y la eficiencia correspondiente de la bomba. La capacidad a la cual la bomba trabaja con más eficiencia se llama punto de máxima eficiencia denominado a veces en inglés con las siglas b.e.p. (best efficiency point).

Leyes de afinidad

Las relaciones que permiten predecir el rendimiento de una bomba a una velocidad que no sea la de característica conocida de la bomba, se llaman leyes de afinidad. Cuando se cambia la velocidad:

1. La capacidad Q en cualquier punto dado en la característica de la bomba varía directamente con la velocidad, n .
2. La carga H varía en razón directa al cuadrado de la velocidad.
3. El caballaje al freno P varía en razón directa al cubo de la velocidad.

En otras palabras, si se asigna el subíndice 1 a las condiciones en las cuales se conocen las características y el subíndice 2 denota las condiciones a alguna otra velocidad, entonces:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}; \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2; \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Estas relaciones se pueden utilizar sin peligro para cambios moderados en la velocidad. Las ecuaciones (2.1) quizá no sean igual de exactas para cambios grandes en la velocidad.

Hay leyes de afinidad similares para los cambios en el diámetro D del impulsor, dentro de límites razonables de reducción del impulsor. En otras palabras:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1}; \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2; \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Ocurren ciertas desviaciones de estas leyes incluso con reducciones más o menos pequeñas.

Velocidad específica

El término “velocidad específica” es el que relaciona los tres factores principales de las características de rendimiento: capacidad, carga y velocidad de rotación, en un solo término. No hay que preocuparse por el análisis matemático utilizado para establecer la relación entre la velocidad específica y las características de funcionamiento de una bomba. En su forma básica, la velocidad específica es un número índice que se expresa con:

$$N_s = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Donde

N_s = velocidad específica

n = velocidad de rotación

rpm; Q = capacidad, lps o gpm; H = carga, ft (carga por etapa en una bomba de etapas múltiples).

La ecuación 2.3 no cambia aunque el impulsor sea de succión sencilla o doble. Por tanto, cuando se cita un valor definido de velocidad específica se menciona el tipo de impulsor.

Aunque se podría calcular la velocidad específica en cualquier condición dada de carga y capacidad, la definición de la velocidad específica supone que la carga y capacidad utilizadas en la ecuación son para la máxima eficiencia de la bomba. El número de velocidad específica es independiente de la velocidad de rotación a la que funciona la bomba.

En la práctica la velocidad específica es un número o factor por medio del cual se puede saber el tipo de flujo requerido en un impulsor (radial, axial o mixto). En la Figura 2.4, se muestra la clasificación existente entre los impulsores de acuerdo a sus velocidades específicas. El factor D_2/D_1 es la relación existente entre diámetro y garganta del impulsor.

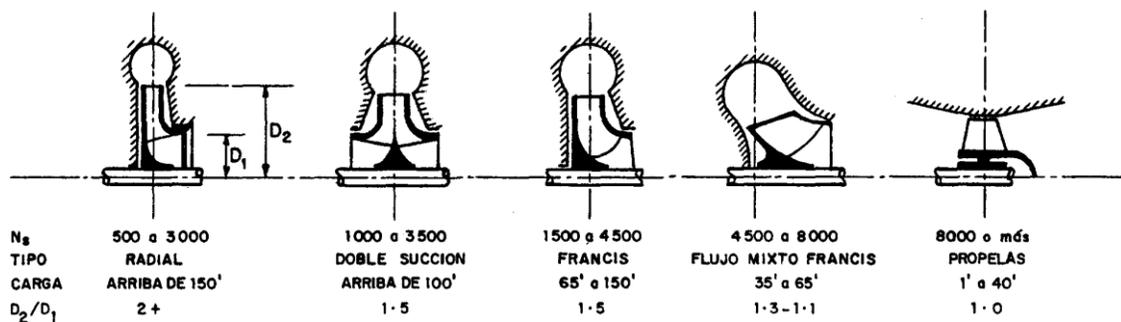


Figura 2.4 Relación de la velocidad específica.

Como se puede apreciar en la Figura 2.4, para grandes alturas se necesitará que el diámetro del impulsor sea mayor con una salida relativamente estrecha, lo cual restringirá la capacidad a conseguir y los rendimientos tenderán a ser bajos. El tipo de flujo de estos impulsores será radial y su velocidad específica será baja. Para mayores capacidades se tenderá a ensanchar el impulsor y reducir su diámetro, con lo que se conseguirá un aumento en la capacidad pero se restringirá la altura. Esta configuración se caracteriza por una velocidad específica más alta y al mismo tiempo por un rendimiento mayor, hasta llegar a un punto en que se tiene un flujo mixto y después bajara la eficiencia debido principalmente a la falta de guía en los cortos pasos del impulsor.

El valor de la velocidad específica también nos indica la altura en la succión permitida para cierta bomba; a mayor velocidad específica la altura en la succión será menor y viceversa.

Las bombas de flujo radial; son aquellas en las cuales la presión es desarrollada principalmente por la acción de la fuerza centrífuga. En bombas de esta clase el líquido normalmente entra al impulsor en el cubo y fluye radialmente hacia la periferia y puede ser de una sola entrada o de doble succión.

Las bombas de flujo axial o hélice; desarrolla la mayoría de su carga por la acción de impulso o elevación de los alabes sobre el liquido. Estas bombas tienen un impelente de una sola entrada y el flujo entra y descarga en forma axial.

Las bombas de flujo mixto; son aquellas en las cuales la carga es desarrollada principalmente tanto por la fuerza centrífuga como por la elevación de los alabes sobre el liquido. Este tipo de bomba tiene un impulsor de una sola entrada y el flujo entra axialmente y descarga en forma axial y radial.

En la figura 2.5 se muestran los tres tipos de alabes de las bombas, así como la dirección del flujo de las mismas.

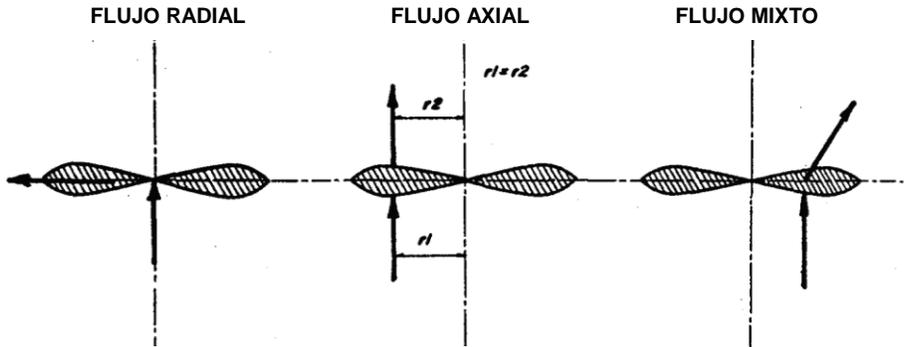


Figura 2.5 Tipos y direcciones de flujo.

2.5 Datos de rendimiento de bombas centrifugas

Las bombas centrifugas tienen una dependencia fuerte entre la capacidad y la presión que debe desarrollar la bomba. Esto hace que la medición de su rendimiento sea más complicada. La curva de rendimiento común grafica la carga total sobre la bomba ha contra la capacidad o descarga Q. como se observa en la figura 2.6

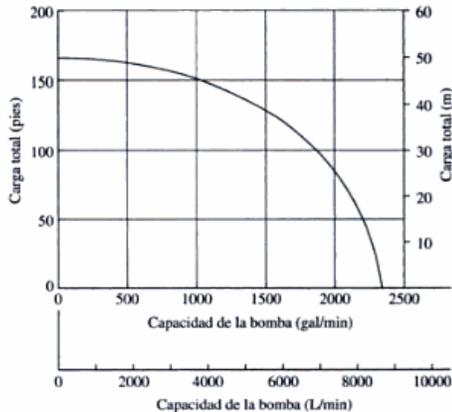


Figura 2.6 Curva de rendimiento de una bomba centrifuga Carga total contra capacidad

Para operar con éxito una bomba, también son importantes la eficiencia y la potencia requerida. La figura 2.7 presenta una medición más completa del rendimiento de una bomba, en la que se superponen las curvas de carga, eficiencia y potencia, y se grafican estas tres contra la capacidad. La operación normal debe estar en la vecindad del pico de la curva de la eficiencia, con eficiencias que por lo común están en el rango de 60 a 80 %, para bombas centrífugas.

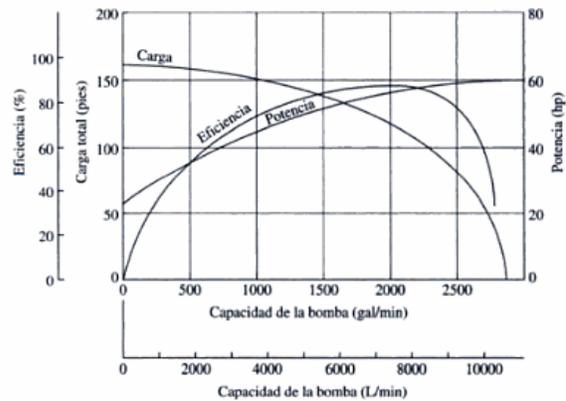


Figura 2.7
Curva de rendimiento de una bomba centrífuga

2.6 Datos del fabricante de bombas centrífugas

Debido a que es posible utilizar diámetros de impulsor y velocidades distintos, los fabricantes de bombas cubren un rango amplio de requerimientos de capacidad y carga con uno cuantos tamaños básicos de bombas. En la figura 2.8 se muestra una grafica compuesta de rendimiento de una línea de bombas, la cual permite determinar con rapidez el tamaño de la bomba.

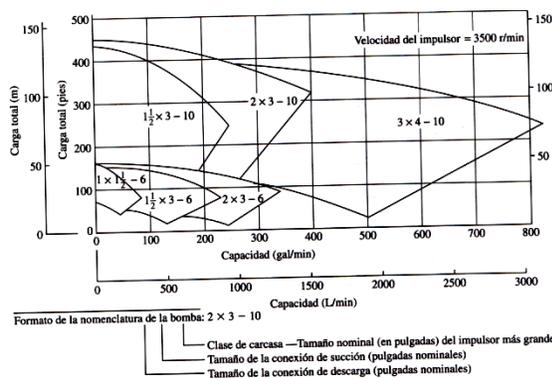


Figura 2.8
Gráfica compuesta de rendimiento para una línea de bombas centrífugas

Efecto del tamaño del impulsor

En la figura 2.9 se muestra como varia el rendimiento de una bomba dada conforme cambia el tamaño del impulsor. Se presentan las curvas de capacidad contra carga para cinco tamaños distintos de impulsor, en la misma carcasa. La velocidad de operación es de 3500 rpm, que corresponde a la velocidad de carga completa de un motor eléctrico de dos polos.

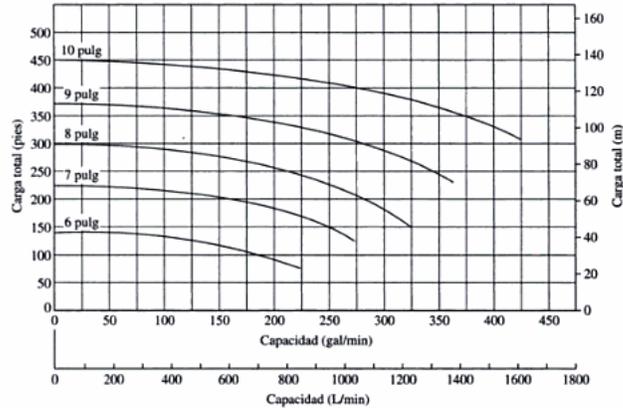


Figura 2.9

Ilustración del rendimiento de una bomba para diámetros diferentes del impulsor
Gráfica de rendimiento de una bomba centrífuga de 2 x 3 - 10, a 3500 rpm.

Efecto de la velocidad

En la figura 2.10 se muestra el rendimiento de una bomba cuando opera a 1750 rpm (velocidad de un motor estándar de cuatro polos), en lugar de 3500 rpm.

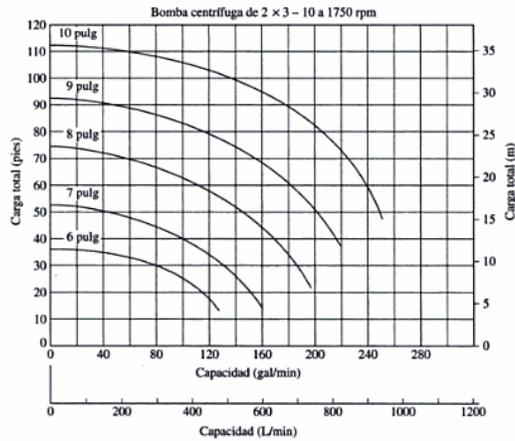


Figura 2.10

Rendimiento de una bomba centrífuga de 2 x 3 - 10, cuando opera a 1750 rpm.

Carga de succión neta positiva que se requiere

Un factor importante por considerar en la aplicación de una bomba es la carga de succión neta positiva que se requiere ($NPSH_R$). La $NPSH_R$ se relaciona con la presión de entrada de la bomba.

Una parte importante del proceso de selección de la bomba es garantizar que la condición de fluido que entra a la bomba sea la apropiada para mantener un flujo completo de líquido. El factor principal es la presión del fluido en la entrada de la bomba, al que es común llamar puerto de succión. El diseño del sistema de tubería de la succión debe proporcionar una presión lo suficientemente alta para evitar que se desarrollen burbujas de vapor dentro del fluido en movimiento, condición que revive el nombre de cavitación. La tendencia a la formación de burbujas de vapor depende de la naturaleza del fluido, su temperatura y la presión en la succión

Los fabricantes de bombas prueban cada diseño para determinar el nivel de la presión de succión que se requiere, con el fin de evitar cavitación, y reportan los resultados como la carga de succión positiva neta requerida, $NPSH_R$, de la bomba en cada condición de capacidad de operación y carga total sobre la bomba. Es responsabilidad del diseñador del sistema de bombeo garantizar que la carga de succión neta positiva disponible, $NPSH_A$, esté muy por arriba de la $NPSH_R$.

El American National Standards –Institute (ANSI) y el hydraulic Institute (HI) emiten juntos estándares que especifican un margen mínimo de 10% para la $NPSH_A$ sobre la $NPSH_R$. Al margen $NPSH$, M , se le define como:

$$M = NPSH_A - NPSH_R$$

Calculo de la $NPSH_A$

El valor de la $NPSH_A$ depende de la presión del vapor del fluido que se bombea, las pérdidas de energía en el tubo de succión, la ubicación del almacenamiento del fluido y la presión que se aplica a este. Esto se expresa como

$$NPSH_A = h_{sp} \pm h_s - h_f - h_{vp} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Donde:

P_{sp} = Presión estática (absoluta) sobre el fluido en el depósito.

h_{sp} = Carga de presión estática (absoluta) sobre el fluido en el almacenamiento; se expresa en metros o en pies de líquido; $h_{sp} = P_{sp}/\gamma$.

h_s = Diferencia de elevación desde el nivel del fluido en el depósito a la línea central de la entrada de succión de la bomba; se expresa en metros o en pies.

h_f = Pérdida de carga en la tubería de succión, debido a la fricción y pérdidas menores; se expresa en metros o en pies.

P_{vp} = Presión de vapor (absoluta) del líquido a la temperatura a que se bombea

h_{vp} = Carga de presión de vapor líquido a la temperatura de bombeo; se expresa en metros o en pies de líquido; $h_{vp} = p_{vp}/\gamma$.

Efecto de la velocidad de la bomba sobre la NPSH

Los datos en los catálogos de bombas sobre la NPSH son para el agua y se aplican solo a la velocidad de operación que se menciona. Si la bomba opera a velocidad diferente, la NPSH que se requiere a la velocidad nueva se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$(NPSH_R)_2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 (NPSH_R)_1 \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Donde los subíndices 1 y 2 se refieren a los datos del catálogo y a las condiciones con la velocidad nueva de operación, respectivamente. A la velocidad de la bomba en rpm se le denota con N.

2.7 Influencia de los variadores de velocidad en la carga dinámica total

La relación de cargas estáticas y de fricción sobre el rango de influencia de operación influye en los beneficios logrados con los VSDs. La carga estática es una característica específica de las instalaciones. Reduciendo esta carga cuando sea posible generalmente se reducen ambos costos de instalación y costos de bombeo del líquido. La carga por pérdidas de fricción debe ser minimizada para reducir el costo del bombeo, pero se hará después de eliminar elementos innecesarios tales como juntas y tramos de tubería las cuales añaden un costo de instalación.

Para sistemas donde predominan las pérdidas por fricción, reducir la velocidad de la bomba mueve el punto de intersección sobre la curva del sistema a lo largo de una línea curva de eficiencia constante como se muestra en la figura 2.11. El punto de operación de la bomba, relativamente es el mejor punto de eficiencia, permanece constante y la bomba continúa operando en esta región ideal. Se siguen respetando las leyes de la afinidad, lo cual significa que hay una reducción sustancial en la potencia absorbida acompañando la reducción en flujo y carga, haciendo de la velocidad variable el método de control ideal.

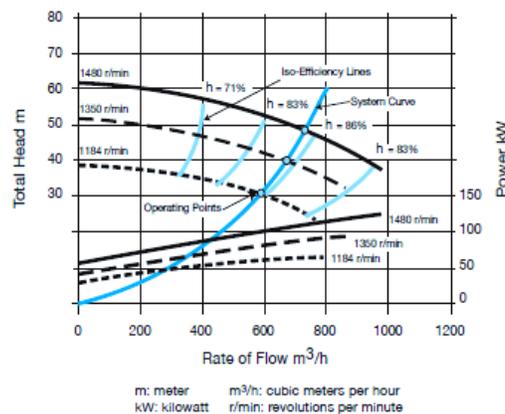


Figura 2.11

Ejemplo del efecto de cambio de velocidad de una bomba en un sistema con pérdidas de fricción únicamente.

En sistemas con alta carga estática, la curva del sistema no comenzará en el origen, esta comenzará en algún valor diferente de cero correspondiente a la carga estática. Por lo tanto la curva del sistema no seguirá la curva de eficiencia constante. De hecho estas se interceptan como se puede ver en la figura 2.12. La reducción en el flujo no es tan proporcional a la velocidad; una pequeña disminución en la velocidad reducirá enormemente la velocidad del flujo y la eficiencia de la bomba. Un error común es utilizar las leyes de afinidad para calcular el ahorro de energía en sistemas con carga estática. Aunque esto puede ser hecho mediante una aproximación, esto puede conducirnos a errores mayores.

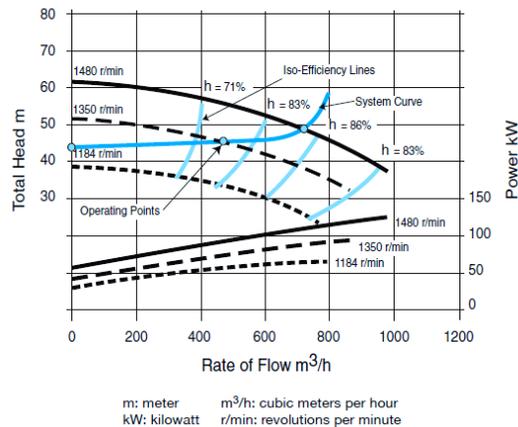


Figura 2.12
 Efecto de cambio de velocidad de la bomba en un sistema con alta carga estática.

Es importante notar que el control de flujo por regulación de velocidad es más eficiente que el control mediante válvulas. Además de ahorrar energía, puede haber otros beneficios a bajas velocidades. La fuerza hidráulica durante el impulso, creada por la presión dentro de la carcasa de la bomba, reduce aproximadamente con el cuadrado de la velocidad. Esta fuerza es aplicada por los cojinetes de la bomba y por lo tanto al reducir la velocidad se incrementa la vida de los cojinetes. Además la vibración y el ruido se reducen y el tiempo de vida de los sellos se incrementa, previendo que el punto de trabajo permanezca dentro del rango de operaciones permisibles.

Efectos de la velocidad en el desempeño de succión de la bomba.

El líquido entra en el ojo del impulsor y este es impulsado hacia dentro de la columna por medio de los bordes de las paletas del impulsor, esta es una acción que provoca pérdidas de presión en la tubería de columna debajo de la bomba. Si el líquido llega a una presión con un margen insuficiente, superior al del vapor del agua, entonces el vapor cavita y aparecerán burbujas a lo largo de las paletas del impulsor, estas burbujas implotarán en las paletas del impulsor cuando la presión sea incrementada. Este fenómeno es conocido como cavitación y tiene efectos indeseables en la vida útil de la bomba.

Si se incrementa la velocidad de la bomba afectará negativamente a la succión, caso contrario si se reduce la velocidad donde tendrá un efecto positivo.

2.8 Elementos de Control y Protección en la conexión de Bombas

En las descargas largas, ya se trate de una sola unidad de bombeo o de varias unidades conectadas a una tubería común, casi siempre es necesario el empleo de ciertos elementos cuyo objeto es, controlar la descarga de las bombas y la de otros, proteger a las tuberías y al equipo de bombeo en general, principalmente del fenómeno llamado golpe de ariete.

A continuación se comentará en forma somera, la función de los elementos de control y protección que se usan con más frecuencia en las plantas de bombeo, para lo cual se considera como vía de ejemplo la figura 2.13., que muestra un caso práctico de tres bombas conectadas, para operar en paralelo, a una línea de descarga.

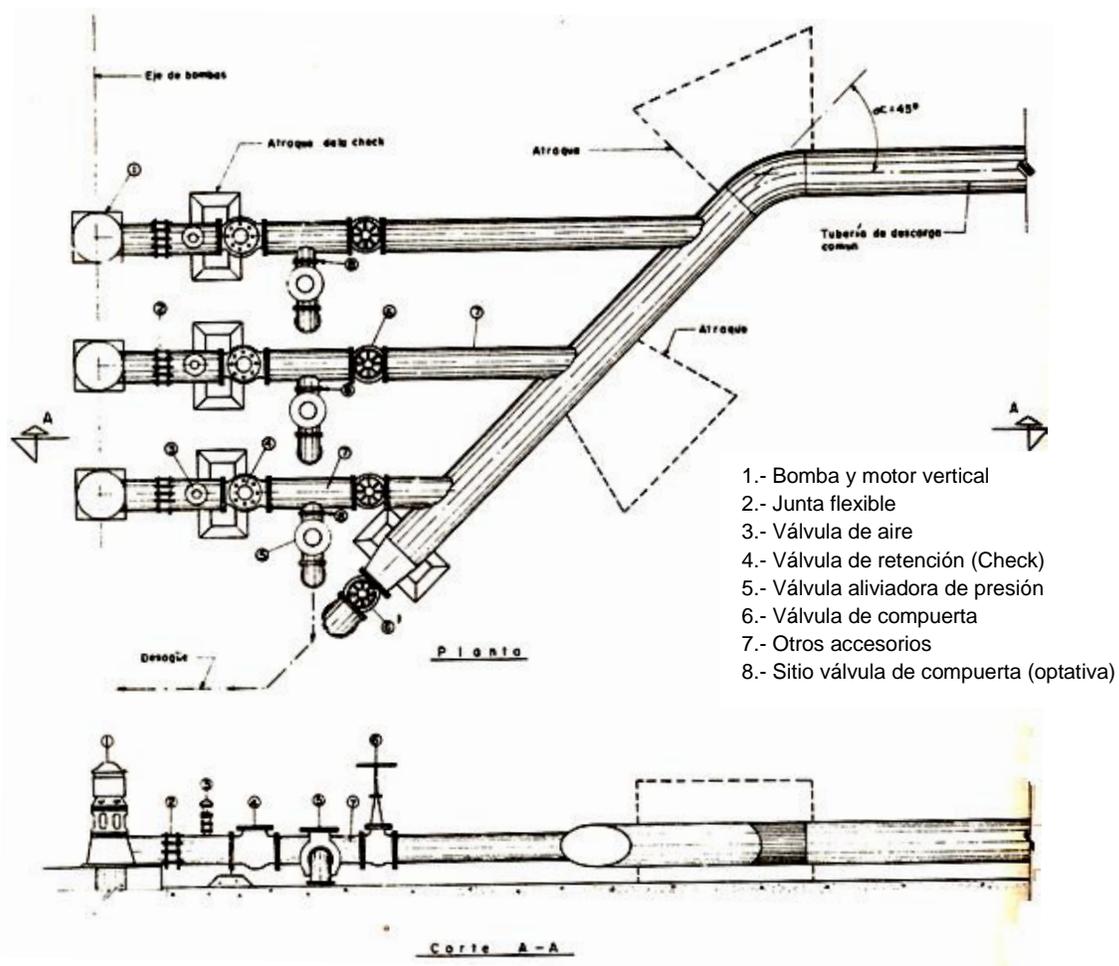


Figura 2.13

Conexión de tres bombas para trabajar en paralelo, mostrando los elementos, de control y protección.

Juntas flexibles

Son recomendables para absorber algunos movimientos ocasionados por el trabajo de la bomba, así como pequeños desalineamientos durante el montaje del conjunto; también se aprovechan para desconectar con facilidad la unidad de bombeo cuando se requiera. Generalmente son empleadas las juntas Dresser y Gibault o algún otro elemento similar.

Válvulas eliminadoras de aire

Algunas se instalan con el objeto de expulsar el aire retenido en la succión cuando la bomba no trabaja. Esta expulsión se efectúa luego de iniciarse la operación de la bomba. Se ubican inmediatamente a la descarga de la bomba, generalmente después de la junta flexible.

El diámetro y características de esta válvula se eligen principalmente en función del gasto de la bomba y de la presión en la tubería. Se puede seleccionar consultando los catálogos de las casas vendedoras de estos dispositivos.

También se instalan válvulas de aire a lo largo de las tuberías de descarga muy largas y cuando son relativamente cortas, con quiebres bruscos, tanto horizontales como verticales. Esto último, no obstante que siempre se trate de evitar, en ocasiones son necesarios debido a las condiciones topográficas del terreno por donde pasara la tubería.

La ubicación de estas válvulas y sus características también se pueden determinar consultando los catálogos de fabricantes y efectuando además, un estudio cuidadoso del perfil del eje de la tubería.

Válvulas de Retención

Se usan con el objeto de retener la masa de agua que se encuentra en la tubería, cuando la bomba suspende su operación y con el fin de evitar esfuerzos excesivos en las bombas debido al fenómeno de golpe de ariete. Esto no quiere decir que estas válvulas eliminen el efecto de ese fenómeno, sino que únicamente lo atenúan.

Válvula de Compuerta

La válvula de compuerta se emplea con el objeto de aislar en un momento dado, algún elemento o sección de la instalación para poder efectuar una reparación,

inspección o dar mantenimiento, sin que se interrumpa totalmente el servicio de bombeo. También se evita con esta válvula, el regreso del agua por alguna bomba que no esté operando debido a la operación parcial del equipo de acuerdo con las necesidades de riego.

En una conexión como la figura 2.13, esta válvula se instala en la descarga de cada bomba, después de la válvula Check y antes de la válvula de alivio.

Válvulas de Mariposa

Las válvulas de mariposa, como la mostrada en la Fig.2.13 puede sustituir a la de compuerta cuando se requieren diámetros grandes y para presiones bajas en la línea; tienen la ventaja de ser más ligeras, son de menor tamaño y más barato. Estas válvulas se operan por medio de una flecha que acciona un disco haciéndolo girar centrado en el cuerpo de la válvula; la operación puede ser manual, semiautomática o automática, mediante dispositivos neumáticos, hidráulicos o eléctricos.

El diseño hidrodinámico de esta válvula permite emplearla como reguladora de gasto y en ciertos casos para estrangular la descarga de una bomba.

Válvulas de alivio contra golpe de ariete

Las válvulas aliviadoras de presión son empleadas para proteger al equipo de bombeo, tuberías y demás elementos en la conexión contra los cambios bruscos de presión que se producen por el arranque o paro del equipo de bombeo.

La válvula está diseñada de tal manera, que puede abrirse automáticamente y descargar al exterior, cuando la presión en el sistema, es mayor que aquella con la que fue calibrada, lográndose con ello el abatimiento de la línea piezométrica. El cierre de esta válvula también es automático y se logra cuando la presión en línea llega a ser menor que la de su ajuste o calibración.

En general, las válvulas de alivio que existen en el mercado, básicamente tienen el mismo diseño, y están construidas en esencia por dos partes; una que corresponde al cuerpo de la válvula propiamente dicho, y la otra formada por los mecanismos de control. En el cuerpo de la válvula se encuentra el elemento actuador, construido por un pistón cuya posición regula el funcionamiento de la válvula. El control de este pistón se efectúa por medio de una válvula piloto, calibrada, que actúa con una presión determinada y no es más que una válvula de aguja de precisión para pequeños flujos. El piloto de control de esta válvula, puede ser hidráulico, eléctrico o de ambos tipos.

Cuando se ha definido el empleo de válvulas de alivio, su diámetro se determina, en función del gasto de escurrimiento en la tubería a la que se conectara, de las presiones originadas por el golpe de ariete y de las pérdidas de descarga, normalmente tolerables, ocasionadas por esta válvula.

Su ubicación se elige después de los elementos de control o al principio de la tubería de descarga común. En una instalación como la Fig. 2.13, en la cual se ha instalado una válvula de alivio a cada bomba, se sitúa entre la Check y la de Compuerta, mediante una "T" de acero o hierro fundido.

2.9 Motor eléctrico

La mayoría de las bombas son operadas mediante motores eléctricos. Los motores eléctricos se han desarrollado a través de los últimos 150 años y las construcciones más comunes son descritas en la figura 2.14.

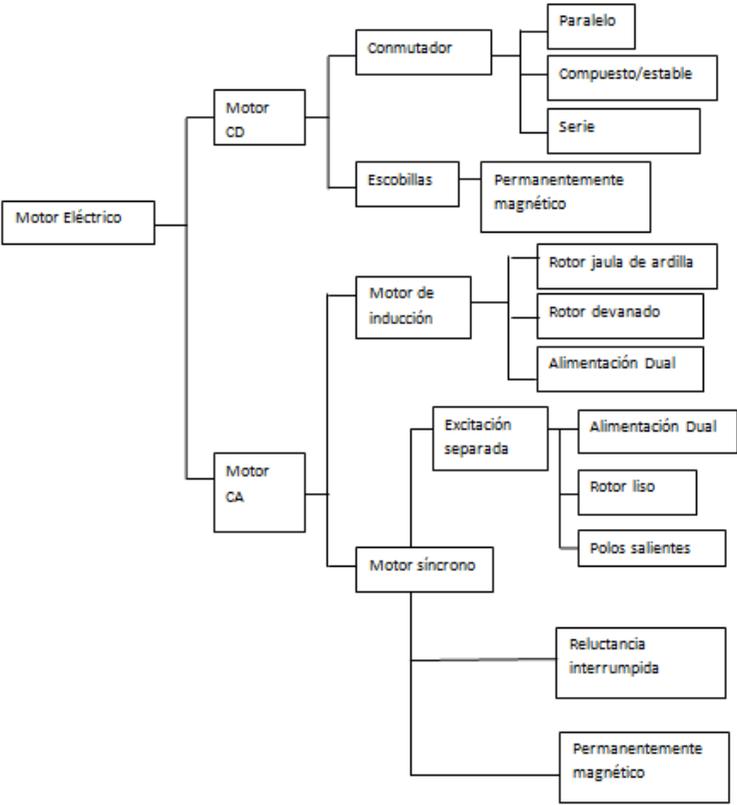


FIGURA 2.14
Clasificación de motores eléctricos

Como para la operación de una bomba no se requiere inicialmente toda la potencia solicitada trabajando el motor a plena carga, como sucede con otros tipos de maquinas; los motores más apropiados y los que generalmente se prefieren son los de inducción de jaula de ardilla con par de arranque normal.

Los motores preferidos son los que están diseñados para dar servicio a la intemperie y a prueba de goteo, principalmente para el agua de lluvia. En bombas verticales lo común es usar motores con flecha hueca por que ofrecen la ventaja de poder introducir en ésta la flecha de la bomba y sujetarla en la parte superior del motor con un aditamento llamado “tuerca de ajuste”, porque sirve para ajustar la posición correcta de los impulsores.

Previendo los daños que se pueden tener en los interiores de una bomba, al girar con un movimiento de rotación inverso al normal por el hecho de regresarse la masa de agua, como consecuencia de un paro súbito ocasionado por cualquier circunstancia, generalmente los motores se solicitan equipados con un dispositivo “trinquete de no retroceso” el cual evita que la bomba gire en sentido contrario.

2.10 Diseño de motores eléctricos

Los motores pueden ser diseñados para diferentes características de torque de arranque, corriente de arranque y deslizamiento.

Los motores diseñados bajo estándares IEC son denotados con letras NY, N, H y HY; mientras que los motores diseñados bajo estándares NEMA se denotan con letras A, B, C y D. Se puede notar que las especificaciones no son totalmente compatibles, pero estas son combinadas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Diseño de motores

IEC	NY	N	H	HY
NEMA	A	B	C	D
Característica				
Par de arranque	Normal	Normal	Alto	Alto
Par máximo	Alto	Medio	Medio	Bajo
Corriente de arranque	Alto	Alto	Bajo	Medio
Deslizamiento a plena carga	Bajo	Medio	Medio	Alto
Uso	Arranque rápido	Estándar	Cargas pesadas o alimentación baja	Alta inercia y unidades reversibles.

Para fuentes de voltaje con operación de inversor, el diseño NY o A es el más recomendable, aunque los diseños N o B normalmente proporcionan un servicio satisfactorio.

2.11 Partes de un motor eléctrico de inducción trifásico

El motor de inducción de CA comprende dos partes electromagnéticas.

- La parte estacionaria llamada estator
- La parte rotatoria llamada rotor, apoyada en cada uno de sus extremos sobre rodamientos.

El rotor y el estator forman parte de:

Un circuito eléctrico, comúnmente fabricado por cobre o aluminio aislado, para transportar la corriente.

Un circuito magnético, comúnmente fabricado de acero laminado, para transportar el flujo magnético

El estator.

El estator es la parte esta estacionaria del motor, la cual consiste de los siguientes elementos:

- La armadura cilíndrica externa del motor, la cual está hecha de placas de acero soldadas entre sí, hierro fundido o aleación de aluminio fundido. Esta armadura puede contener pies o flancos de montaje.
- El camino magnético, el cual comprende un modulo de ranuras de laminas de acero prensadas dentro del espacio cilíndrico de la armadura. El camino magnético es laminado para reducir las corrientes de Eddy, tener bajas perdidas y bajo calentamiento.
- Un modulo de devanados eléctricos aislados, los cuales son colocados dentro de las ranuras del camino magnético laminado. La sección a través del área de los devanados debe ser lo suficientemente larga para alcanzar la potencia nominal del motor. Para un motor trifásico, se requieren tres módulos de devanados, uno para cada fase.

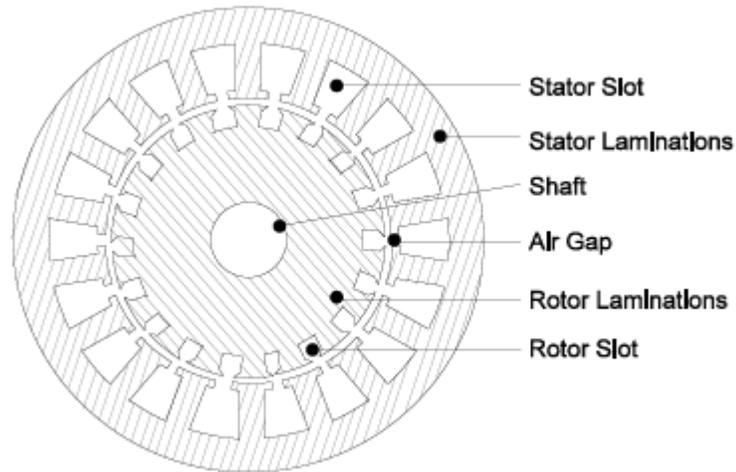


Figura 2.15
Diagrama de un motor de inducción jaula de ardilla

El rotor

Esta es la parte giratoria del motor, el rotor consiste en un modulo de láminas de acero prensado en forma de un cilindro magnético.

El circuito eléctrico del motor puede ser uno de los siguientes casos:

- Tipo rotor devanado.- Este comprende tres módulos de devanados aislados con conexiones salientes a tres anillos deslizantes montados en la flecha. Las conexiones externas a la parte giratoria son hechas por medio de escobillas sobre los anillos deslizantes.
- Tipo rotor jaula de ardilla.- Este comprende un modulo de barras de aluminio o cobre instaladas dentro de las ranuras, los cuales son conectados a el final del rotor. La construcción de este motor es similar a una jaula de ardilla, las barras de aluminio en el rotor se encuentran dentro de las ranuras del motor, lo cual produce una construcción muy robusta. De hecho las barras de aluminio del rotor están en contacto directo con las laminas de acero, prácticamente todo la corriente del rotor fluye a través de las barras de aluminio y no en las laminaciones.

Elementos auxiliares

Los otros elementos auxiliares que se requieren para completar el motor de inducción son:

- Dos tapas para soportar los dos rodamientos, una en parte delantera y otra en la parte trasera.
- Dos rodamientos para apoyar la flecha giratoria
- La flecha de acero para transmitir el torque a la carga
- Un ventilador de enfriamiento localizado en la parte trasera del motor para proporcionar enfriamiento al estator y al rotor.
- La caja de terminales en la parte superior o en un lado, para poder recibir las conexiones eléctricas externas.

2.12 Reducción de la capacidad en motores

Variación de voltaje y frecuencia

Durante el funcionamiento de los motores eléctricos, se presentan diferentes condiciones en la operación y comportamiento, tal es el caso de disminución o incremento del voltaje especificado en su placa. La Norma NEMA reconoce el efecto de la variación del voltaje y frecuencia, en el desempeño de los motores eléctricos. El estándar recomienda que esta variación, no debe exceder de 5%. Es importante diferenciar que el voltaje nominal en motores y el voltaje del sistema son diferentes. El voltaje nominal del motor ha sido seleccionado para ser congruente con el voltaje de utilización disponible en sus terminales. Esta tensión permite caídas de voltaje en el sistema de distribución y variaciones de voltaje, cuando la carga en el sistema cambia.

Los motores son más eficientes cuando se operan a su voltaje nominal. La eficiencia de un motor que opera a plena carga, no se altera en forma notable si existen ligeras variaciones de tensión. En cambio, si la carga es menor, las variaciones de tensión reducen significativamente la eficiencia. Los motores de alta eficiencia, son más tolerantes a las variaciones de voltaje, debido a su diseño y construcción.

Construcción del motor y enfriamiento

Todos los motores eléctricos tienen pérdidas, principalmente manifestadas en forma de calor, las cuales deben ser disipadas, normalmente mediante el aire a temperatura ambiente, un motor convencional está diseñado para disipar el calor cuando está operando a una velocidad nominal y plena carga.

Motores instalados en ambientes secos

La mayoría de los motores eléctricos están diseñados para operar con el enfriamiento del aire a través de la estructura mediante ventiladores montados directamente a la flecha del motor. En casos especiales como es en motores de gran potencia se utilizan intercambiadores de calor de agua/aire o aire/aire.

Motores para bombas sumergibles

En principio la mayoría de las bombas sumergibles usan un motor de inducción jaula de ardilla que no tiene diferencias significativas de la forma típica de un motor jaula de ardilla, excepto en su forma de enfriar el motor.

Los motores de bombas sumergibles, están provistos de un sistema de enfriamiento interno o externo, el cual funciona mediante una sumergencia total o parcial en el líquido bombeado. En tal caso el enfriamiento del motor no es afectado por la reducción de velocidad del motor.

2.13 Partes que integran una planta de bombeo

Las partes que, en general, integran una planta de bombeo con fines de riego se clasifican como sigue:

- Captación u obra de toma
- Obra de succión o cárcamo
- Equipo de bombeo
- Descarga
- Caseta de controles
- Subestación eléctrica

Captación u obra de toma

Por medio de la obra de captación se toma el agua requerida de la fuente de abastecimiento para después conducirla hasta el cárcamo en donde opera el equipo de bombeo.

De acuerdo con las características de la fuente y del proyecto, la obra de captación adquiere características propias, pudiendo consistir desde un simple tajo en la margen de un río, hasta en una presa de almacenamiento.

En la figura 2.16 se tienen esquemáticamente algunos ejemplos típicos de bombeo

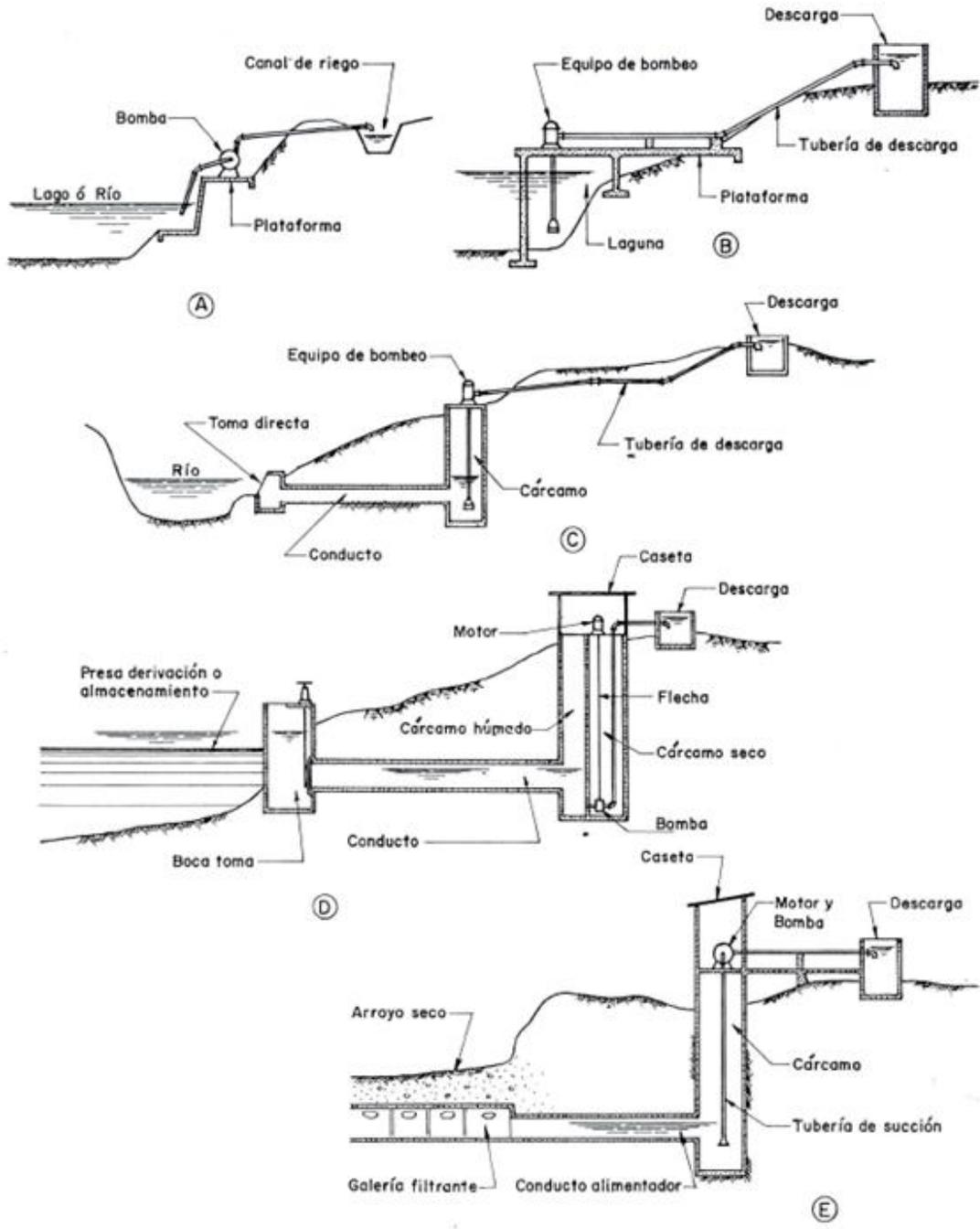


Figura 2.16
Casos típicos de bombeo

Tomando en cuenta lo más común y corriente del caso, se tomara el aprovechamiento de una corriente superficial de régimen permanente; un río, un canal, un dren, etc. Y en general una corriente de cauce más o menos definido.

Existen algunas recomendaciones para ubicar la toma directa, para derivar las aguas de un río.

1. La distancia a la zona de riego o a la probable descarga deberá ser la mínima posible.
2. El tramo de la corriente que se escoja para la obra, no deberá estar expuesto a socavaciones ni a deposito excesivo de azolves, por los perjuicios que estos ocasionan, y por ello se recomienda elegir un tramo lo más recto posible de la corriente y evitar localizaciones en curva.
3. Se evitarán lugares cercanos a caídas y rápidas de la corriente para no tener velocidades fuertes del agua al frente de la estructura. En otras palabras, la pendiente del río deberá ser suave y más o menos uniforme.
4. Geológicamente el terreno deberá ser lo suficientemente resistente para desplantar la estructura, evitando las zonas de derrumbes o cauce inestable.

Partes de la toma

Canal de acceso

Se construye para comunicar, en forma gradual, la fuente con la toma y también se aprovecha el paso del agua por él para sedimentar materia en suspensión que lleva el agua.

Las dimensiones que se le asignan están de acuerdo con el gasto y la velocidad que se considere debe dársele al agua para entrar a la toma (de 0.4 a 0.8 m/seg.), además del procedimiento de construcción empleado y la clase de material en donde se aloje. Conviene diseñar la plantilla de este acceso, en contra pendiente y disminuyendo su ancho hacia la toma hasta tener la dimensión horizontal de la rejilla.

Si es de longitud considerable, conviene que por lo menos en un tramo adjunto a la entrada sea revestido para facilitar su limpieza periódica.

Estructura de entrada.- Constituye la estructura de entrada del agua sirviendo de apoyo a las rejillas. Aloja los mecanismos o sistemas de control para el paso del agua, así como lo necesario para facilitar su inspección y limpieza cada vez que lo requiera. En ocasiones cerca de ella se antepone un muro para retener y desviar peces.

Rejillas.-Adquieren formas y tamaños diversos que dependen de la naturaleza de los cuerpos que va a retener, gastos y características del equipo de bombeo, de la manera para apoyarlas, así como de su accesibilidad para lograr su limpieza y restitución.

La rejilla debe ser paralela a la corriente del río, para evitar que quede expuesta a los choques directos con los cuerpos de arrastre, los que trae como consecuencia su deterioro, sobre todo cuando se localiza muy cerca o en el cauce de la fuente. Esto evita también la entrada de azolves.

Adoptar una posición vertical o inclinada para apoyarla en la estructura, es cuestión de considerar dadas las circunstancias del caso, la facilidad para su limpieza, extracción, etc., y algunas conveniencias de limitación de espacio.

Se construyen con perfiles laminados de fierro estructural, empleando generalmente soleras para los barrotes que se soldan aun marco formado con ángulos o también con soleras.

La separación de los barrotes es muy importante en problemas de bombeo, pues para fijarlas, de antemano se debe conocer aunque sea aproximadamente el tamaño máximo de los cuerpos arrastrados por el agua que pueden pasar por el equipo sin ningún perjuicio. Los fabricantes de bombas proporcionan este dato característico, al que se llama “paso de esfera” que se refiere a la medida mayor de un cuerpo que puede pasar por los impulsores sin inconvenientes. Por lo que la separación entre barras tendrá como valor máximo esa medida, si es que no queda limitada por otro concepto.

Conocidos el gasto de bombeo y el “paso de esfera” se estará en posibilidad de proporcionar la rejilla.

El área neta necesaria se determina con la fórmula hidráulica de la continuidad, que es:

$$Q = A_n V$$

Despejando el área en m^2 :

$$A_n = \frac{Q}{V}; \text{ en } m^2$$

Donde:

A_n = área en m^2

Q = Gasto de bombeo en $m^3/seg.$

V = Velocidad al entrar el agua cuyo valor se fija entre 0.40 y 0.80 m/seg

Al calcular la sección transversal de las soleras estructuralmente, y adoptar su separación correspondientemente podrá conocerse el área de la rejilla (área bruta), procediendo a diseñarla de manera que, en lo posible quede construida por tableros de peso tal que sea fácil de transportar y mover con la fuerza humana.

El cálculo de la rejilla se hace considerando que esta totalmente obstruida, y que se rompe con carga máxima exteriormente con un mínimo de 6 m. de agua.

Ocasionalmente, la abundancia de peces origina la necesidad de instalar una rejilla localizada adecuadamente antes de la estructura de entrada y de magnitud independiente al gasto de bombeo. En esta rejilla la separación entre barras es bastante reducida, debiéndose prever la facilidad y necesidad de limpiarlas o de sustituirla periódicamente.

Conducto

Para llevar el agua de la toma al cárcamo, se emplean las estructuras que se agrupan en:

Canales abiertos

Túneles

Conductos enterrados

Desde el punto de vista hidráulico, es conveniente que cualquier tipo de conducto adoptado funcione como canal y con régimen lento, principalmente para la condición de tener el nivel mínimo del agua en el río y requerir el gasto máximo de bombeo. Esto se hace con el objeto de evitar fuertes velocidades en la descarga, que en este caso es el cárcamo.

Canales abiertos

Se emplean generalmente para gastos pequeños y en longitudes cortas; además si las condiciones topográficas y geológicas permiten hacerlo, como cuando se localizan a poca profundidad, donde no sean probables los problemas de derrumbes y consecuentemente de su limpieza. Es factible hacer canal abierto cuando el río transporta pocos azolves en épocas de crecientes o cuando estas aguas no pueden entrar libremente por arriba del canal.

Se recomienda revestir la sección hidráulica, y en los tramos de mayor profundidad hacer la excavación escalonada, es decir, dejando banquetas, para la mejor estabilidad del tajo y evitar en parte que las basuras y terrenos de la superficie lleguen al fondo.

Estos canales necesitan de un servicio de desazolve constante.

Túneles

Fundamentalmente si las características geológicas y topográficas del lugar, son favorables para su construcción y la longitud del conducto y gasto del bombeo lo ameriten es casi seguro que convenga un túnel.

Desde el punto de vista estructural, la sección circular es la mejor, pero hidráulicamente, pero hidráulicamente en este caso de circulación libre del agua es más recomendable otra con base rectangular y coronada con un arco o del tipo herradura. Las dimensiones se eligen considerando el área hidráulica y los requisitos mínimos que exige la práctica de construcción.

Revestir un túnel o no, depende de la bondad del material en donde se practica y de su función. En este caso conviene siempre revestirlo para evitar filtraciones y saturación del terreno adyacente. Sin embargo, cuando se tenga la seguridad de que el nivel del agua en cualquier época no va a llenar el túnel, probablemente convenga revestirlo hasta una altura determinada

Conductos enterrados

Se recurre a ellos cuando las condiciones del terreno no son las indicadas para perforar un túnel o que el área hidráulica necesaria sea tal, que no se justifique hacer esa construcción. En ocasiones ante la alternativa de emplear un canal abierto lo mejor es decidirse por un conducto enterrado.

Es frecuente determinar el uso de un conducto cerrado, cuando las excavaciones para su construcción son de poca profundidad y que exista el peligro de azolves abundantes. En estos casos se construye a cielo abierto sosteniendo los taludes de un modo provisional durante la construcción o dándole inclinación estable durante el lapso de la obra. Una vez colocado el conducto se rellena en su alrededor y en la clave por lo menos lo necesario para su protección. El resto de la excavación generalmente se deja abierta.

Las secciones usuales son trapeciales, rectangulares o circulares o una combinación de estas dos últimas, fabricándose de concreto o mampostería. También suelen emplearse tuberías prefabricadas de asbesto-cemento o de concreto.

Si al calcular el área hidráulica para el gasto requerido, resulta relativamente pequeña, es conveniente aumentar su sección para facilitar su limpieza de lodos o arenas que con el tiempo pueden tenerse. Por este motivo se recomienda construir pozos de visita a distancias no mayores de 100 m.

Cárcamo

El pozo de succión o cárcamo es la estructura vertical en donde descarga el conducto de la toma y se instalan las bombas para elevar el agua al nivel deseado.

Consiste generalmente en un depósito enterrado construido de concreto o mampostería cuyas dimensiones están en función de la magnitud del equipo que se vaya a instalar y del procedimiento empleado en su construcción. Además en su diseño se toma en cuenta la facilidad que se debe tener para su inspección y limpieza periódicas.

Equipo de Bombeo

Lo constituyen todas las unidades (bomba y motor) de bombeo instaladas para proporcionar el gasto requerido, así como los accesorios de control y protección (válvulas) antes de iniciarse la descarga común y los dispositivos de arranque y parada.

Descargas

Puede decirse que la descarga de una planta de bombeo comprende todos los elementos e instalaciones que se requieren para conducir el agua, desde la salida de la bomba hasta donde se inicia su distribución.

De acuerdo con lo anterior, en la descarga de la planta se distinguen básicamente los siguientes elementos: tubería de descarga y tanque de descarga.

Tanque de Descarga

Dependiendo de la magnitud del proyecto podrá ser o no necesario un tanque de descarga propiamente dicho, pues en ocasiones para gastos pequeños, la bomba puede descargar directamente al canal de riego en un tramo que desde luego deberá estar revestido.

Ordinariamente este tanque se construye sobre la superficie, de sección rectangular, pero puede presentarse la necesidad de sobreelevarlo con relación al terreno, es decir, construir un tanque elevado con el fin de proporcionar en la zona

de riego, las presiones requeridas: por ejemplo, tratándose de un riego por aspersión.

Subestación eléctrica

Esencialmente una subestación eléctrica consta de las siguientes partes:

Transformador.- Mediante estos aparatos se cambia el voltaje de la corriente, obteniéndose el deseado.

Cuchillas fusibles.- Se emplean para proteger la instalación contra fallas debidas a sobrecorriente causada por un corto circuito.

Interruptor con carga.- Sirven para proteger la instalación contra sobrecorrientes por fallas en la línea de alimentación y además desconectar con carga al transformador, a fin de darle a este servicio de mantenimiento.

Apartarrayos.- Protege la subestación contra las descargas atmosféricas.

Equipo de Medición.- Registra la cantidad de energía consumida.

La magnitud de la subestación dependerá principalmente de la potencia de cada motor y de la total en la instalación.

Caseta de controles

Se construye para alojar los controles eléctricos que operan las bombas, como arrancadores, estación de botones, etc.

Se localiza de tal manera que el acceso a ella sea rápido y fácil. Generalmente se procura que este cerca de la subestación para acortar la longitud de los cables que conducen la energía de bajo voltaje.

2.14 Elección de un equipo de bombeo

La secuela que se propone para determinar un equipo de bombeo, comprenderá los siguientes puntos.

- 1.- Datos necesarios (lugar, sitio de captación, cárcamo, riego)
- 2.- Determinación del número de bombas
 - Capacidad de cada bomba
 - Porcentaje de utilización del equipo y flexibilidad de operación.
- 3.- Selección de la bomba tipo
 - Condiciones de operación
 - Carga total aproximada

- Sumergencia
- (CNSP) disponible
- Características de Varias bombas. Consideraciones
- Bomba tipo probable
- 4.-Cálculo afinado de la bomba
 - Condiciones de operación
 - Carga Total
 - Empuje axial
 - Velocidad específica
 - Capacidad del motor
 - Resumen del cálculo. Características de la bomba
 - Composición del equipo de bombeo
 - Dimensiones del cárcamo
- 5.-Cotización del fabricante
 - Datos para solicitar una cotización.
 - Bomba elegida. Características.

A continuación se describen algunos de los puntos de mayor importancia en la elección del equipo de bombeo.

Determinación del número de bombas

Al haber hecho la planeación de la zona de riego para un plan de cultivos determinado y llegar a obtener las demandas de aguas mensuales, se observara que son diferentes, presentándose en uno de los meses su máximo valor.

El equipo de bombeo deberá elegirse para cubrir la demanda máxima, transformada a un gasto ($m^3/seg.$) que también será el máximo necesario y que se calcula, tomando en cuenta la frecuencia de riego y el tiempo diario de bombeo.

En los casos en los que el gasto máximo requerido es ya considerable y se pretenda emplear una sola unidad, es casi seguro que estará, muy “sobrada” para los meses en que el gasto máximo no se requiera y ello originaria un costo de energía innecesaria, mala distribución y aprovechamiento del agua y probablemente dificultades en la operación, porque sería una sola bomba. Aun cuando es posible regular el gasto de una bomba (estrangulando la descarga o variando la velocidad de rotación, para lo cual se necesita un motor de velocidad o de acoplamiento variable), en problemas de riego es más práctico y conveniente la solución de instalar más de una unidad; pero elegir un número determinado sin algún estudio que nos permita normar un criterio en la elección no es correcto.

Selección de la bomba tipo

Considerando las alternativas más viables para elegir el número de unidades y consultando los catálogos de los fabricantes, se debe comparar las características. Dentro de estas características, una de las más importantes es quizá la eficiencia, pues tomando en cuenta, que de este factor dependerá en gran parte la economía que se tenga al operar el sistema durante su vida útil.

DATOS

Para explorar las curvas características de las bombas de diferentes fabricantes se necesita conocer:

Q Gasto de la bomba, cuyo valor será según la alternativa propuesta.

H Carga dinámica total aproximada y su posible variación.

(CNSP)_d Carga Neta de Succión Positiva disponible.

Además, tener presente el ciclaje de la energía eléctrica.

Carga dinámica total aproximada y su posible variación.

Se dice que el valor de la carga total de operación para estos fines es aproximado, porque inicialmente se suponen las dimensiones de ciertos elementos que al final pueden hacer variar el valor de dicha carga; por ejemplo, el diámetro de la tubería de succión o el de la descarga y en ocasiones, pueden no ser los definitivos una vez elegida la bomba y haber afinado el cálculo. Sin embargo, esa variación generalmente es pequeña y para fines comparativos es suficiente con adoptar a juicio dimensiones probables. Por otra parte, hay que tomar en cuenta que en la curva de operación de una bomba se pueden absorber las pequeñas variaciones de una carga, por cualquier eventualidad, sin que cambien notablemente las características de funcionamiento.

CAPITULO 3

ENERGIA ELECTRICA Y COSTOS DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Un equipo accionado mediante un variador de velocidad emplea generalmente menor energía que si dicho equipo fuera activado a una velocidad fija constante. Por ejemplo, cuando una bomba es impulsada por un motor que opera a velocidad fija, el flujo producido puede ser mayor al necesario. Para ello, el flujo podría regularse mediante una válvula de control dejando estable la velocidad de la bomba, pero resulta mucho más eficiente regular dicho flujo controlando la velocidad del motor, en lugar de restringirlo por medio de la válvula, ya que el motor no tendrá que consumir una energía no aprovechada.

3.1 Factores que implican un mayor consumo de energía eléctrica

El ahorro de energía en los equipos, comienza con la selección apropiada del motor, siempre existe uno adecuado a las necesidades, como son: las condiciones ambientales, operación, arranque, velocidad, tamaño y potencia. Los mayores ahorros de energía eléctrica se obtienen cuando el motor y su carga operan a su capacidad nominal.

Factor de potencia

Es el factor de aprovechamiento del consumo de energía eléctrica en trabajo útil o fuerza mecánica, que es el cociente de la potencia activa (KW) entre la potencia aparente (KVA). El factor de potencia mínimo recomendable, es de 90%. Cuando se tiene un valor superior al 90 % se aplica una bonificación por parte de la Compañía Suministradora, mientras que un porcentaje menor significa energía que se desperdicia y la empresa aplica un cargo.

En los circuitos eléctricos de corriente directa, la potencia es el producto del voltaje por la corriente. En corriente alterna, se presenta un ángulo ϕ ; el coseno, de este ángulo es un factor de corrección, por el que hay que multiplicar el producto del voltaje por la corriente; para obtener la potencia real es decir:

$$P = \sqrt{3}VI\cos\phi \quad \text{Ec. (3.1)}$$

La potencia real, se designa normalmente como activa y el parámetro $\cos\phi$, es el factor de potencia (F.P.) y nos indica el desfase que existe entre el voltaje y la componente fundamental de la corriente, esto es:

$$F.P. = \cos\phi = \frac{P}{S} = \frac{KW}{KVA} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

La potencia obtenida con la expresión anterior, se denomina potencia reactiva, que es la encargada de generar el flujo electromagnético que requieren los motores y transformadores para su funcionamiento cuando están instalados y conectados. Al existir una gran cantidad de estos equipos en una instalación, los requerimientos de potencia reactiva también aumenta, lo cual produce una disminución en el factor de potencia.

Un bajo factor de potencia, reduce la eficiencia en los equipos eléctricos y causa efectos negativos, como son:

- Aumento en la intensidad de corriente
- Caída de voltaje
- Sobrecargas en transformadores, generadores y líneas de distribución.
- La temperatura en cables aumenta ocasionando pérdidas.

Los motores producen un bajo factor de potencia, cuando trabajan por debajo del 50% de la carga. Así también, el calibre de los conductores en los equipos se diseñan, para ser usados con un cierto valor de corriente; para no ser dañados, se deben operar sin que la corriente sobrepase ese valor de diseño. El exceso de corriente, debido al bajo factor de potencia, obliga a utilizar conductores de mayor calibre.

El uso de equipos electrónicos como computadoras, convertidores, variadores de frecuencia, arrancadores de estado sólido y otros componentes, complica la corrección del factor de potencia, ya que producen cargas no lineales.

Cuando el factor de potencia se corrige se logran ahorros y beneficios, como son:

- Se elimina el cargo por bajo factor de potencia.
- Se reducen las caídas de tensión.
- Disminuyen las pérdidas por efecto Joule (I^2R) en transformadores, cables y otros equipos.
- Ayuda a estabilizar el voltaje del sistema.
- Se incrementa la vida útil de equipos e instalaciones.
- Se ofrece una bonificación cuando se tiene un factor de potencia mayor a 0.9.

Armónicas

La utilización de equipo electrónico y semiconductores electrónicos de potencia ha cambiado las características de carga en las instalaciones eléctricas modernas, a estas cargas se les denomina cargas no lineales, y el efecto que producen, son las armónicas.

Las armónicas distorsionan la forma original de onda del voltaje y la corriente suministrada, son múltiplos de la frecuencia fundamental. Así, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz), y séptima (420 Hz), por ejemplo.

Los motores están diseñados para operar, con energía eléctrica a una frecuencia de 60 Hz y una forma de onda sinusoidal. Utilizar la energía eléctrica con una onda distorsionada, disminuye la eficiencia del motor.

Las armónicas generadas por los rectificadores trifásicos, tiristores de potencia, equipos conversores AC/DC y controladores de motores, distorsionan el voltaje y causan problemas a otras cargas conectadas a la línea.

3.2 Costo del ciclo de vida de un equipo de bombeo

El costo inicial de un equipo de bombeo es frecuentemente una pequeña parte del costo total del ciclo de vida útil. El costo de vida útil representa el costo total al comprar, instalar, operar, reparar y dar mantenimiento a un sistema de bombeo durante su tiempo de vida. Los costos por tiempo no utilizado y medio ambiente también son considerados.

La ecuación para calcular el costo de ciclo de vida (CCV) es la siguiente:

$$\text{CCV} = \text{La suma de } (C_c + C_i + C_e + C_o + C_m + C_p + C_d + C_m) \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Donde:

C_c = Costo de compra (bombas, sistemas, tuberías, equipos auxiliares)

C_i = Costo de instalación y servicio.

C_e = Costo de energía en el proceso que se realizará (incluye consumo de bomba, sistemas de mando y control y todos los servicios auxiliares).

C_o = Costo de operación

C_m = Costo de mantenimiento

C_p = Costo por pérdida de producción.

C_d = Costo por daño y reconstrucción ambiental.

3.3 Influencia de los variadores de velocidad en el equipo de bombeo

La manera en la que influyen los variadores de velocidad en cada uno de los componentes del costo de ciclo de vida es la siguiente:

Tipo de costo	Influencia en el costo utilizando un Variador de Frecuencia.	Descripción.
C_c	Presenta ahorro.	El ahorro en el costo de válvulas y tuberías de rodeo, pueden compensar el costo del VSD.
C_i	Presenta ahorro.	Los sistemas VSD pueden necesitar mayor tiempo de instalación y cableado, pero de cualquier manera se justifica si se elimina el control por medio de válvulas y arrancadores.
C_e	Disminuye.	Si son correctamente aplicados, se pueden lograr grandes ahorros de energía operando la bomba a una velocidad reducida acorde a la demanda del sistema.
C_o	No cambia	El costo de operación es el mismo. Los PLCs modernos están bien diseñados para trabajar con VSDs
C_m	Disminuye	El costo de mantenimiento se ve reducido enormemente cuando se usa un VSD en lugar de una válvula. Además de reducir las cargas asociadas a los arrancadores. Los sistemas VSDs requieren muy poco mantenimiento.

C_p	Disminuye	El costo por pérdida de producción también disminuye, debido a que los sistemas que emplean VSDs pueden arrancar y detenerse lentamente, además de operar a velocidades reducidas por mucho tiempo.
C_d	No cambia	El costo es el mismo que en equipos de bombeo tradicionales.

Eliminación de válvulas de control.

Las válvulas de control son usadas para ajustar el flujo de salida de las bombas, ajustándolas a los requerimientos del sistema. Usualmente una bomba de velocidad constante se encuentra bombeando contra una válvula de control, la cual se encuentra parcialmente cerrada la mayoría de las veces. Incluso en las condiciones de flujo máximo, una válvula de control está diseñada para estar cerrada en un 10%, para propósitos de control y por lo tanto se considera una resistencia ocasionada por la fricción. La energía es por lo tanto desperdiciada sobreponiéndose a las pérdidas por fricción a través de la válvula.

Con la instalación de un variador de velocidad, la descarga de la bomba puede ser variada de acuerdo con la demanda del sistema sin tener que estrangular la bomba. Por lo tanto las pérdidas relacionadas con el estrangulamiento de la válvula pueden ser eliminadas. En muchos casos, donde las pérdidas originadas por el sistema son difíciles de calcular, los márgenes de seguridad conducen a sobredimensionar la capacidad de la bomba. Mediante el uso de variadores de velocidad, tales sobredimensionamientos pueden ser compensados.

Los costos mecánicos por instalación de válvulas, y los asociados con trabajos de soldadura eléctrica en tubería, pueden ser remplazados por el costo de compra e instalación de un VSD.

Eliminación de arrancadores

Los sistemas de bombeo siempre requieren de un arrancador eléctrico. En cambio la mayoría de los variadores de velocidad trabajan sin arrancador y además también proporcionan un arranque suave.

Otros beneficios de variar la velocidad

Además de ahorrar energía, podemos tener otros beneficios al operar un sistema de bombeo a bajas velocidades. La fuerza hidráulica sobre el impulsor, creada por la presión dentro de la carcasa, reduce aproximadamente con el cuadrado de la velocidad. Estas fuerzas son soportadas por los cojinetes de las bombas, por lo tanto si operamos a una baja velocidad se incrementará la vida útil de los cojinetes. En bombas rotodinámicas se ha demostrado a través de la experiencia que la vida útil de los cojinetes es proporcional a la séptima potencia de la velocidad.

Otra ventaja se encuentra en la disminución del ruido y la vibración de los equipos e incrementar la vida útil de los sellos permitiendo así que el punto de trabajo permanezca dentro del rango de operación permitido.

Ahorros de energía con el ajuste de la velocidad de la bomba

Los porcentajes de ahorro de energía con distintos gastos y diferentes tipos de sistemas de fricción se resumen en la tabla 3.1. Se debe tener en cuenta que los sistemas hidráulicos típicos se compran con capacidad 15% mayor que la de diseño y que la reducción promedio está cerca del 87.5%.

Tabla 3.1 Ahorros de energía en condiciones de reducción, %

Flujo nominal, %	Tipo de sistema			
	100% F	75% F	50% F	25% F
100	21	16	9	3
87.5	38	31	20	12
75	57	47	35	20
50	81	69	55	41

Los ahorros de energía se calculan fácilmente con la tabla. Se puede evaluar la rentabilidad de una inversión más elevada en un sistema de velocidad variable al comparar el costo adicional de ese equipo con la reducción en los gastos de operación.

Por ejemplo, supóngase una instalación de una bomba centrífuga con un motor de una velocidad y 200 hp en un sistema con 75% de fricción, una carga de 185 hp con el caudal de diseño y un costo de \$0.4000 (cero punto cuatro cero cero pesos) por cada kilowatt hora de energía eléctrica y un ciclo de trabajo del 15% del tiempo de funcionamiento al 100% del caudal de diseño, 65% al 87.5% y 15% al 50%, con un total de 8760 horas al año.

Al designar h_{pd} como los hp de diseño, op como horas de funcionamiento, c como costo de energía y E como eficiencia de la bomba, el costo anual de operación de este sistema en pesos asciende a:

$$\$ = \left(\frac{0.746 * h_{pd}}{E} \right) \times op \times c \quad \text{Ec. (3.4)}$$

$$\$ = \left(\frac{0.746 * 185}{0.92} \right) \times 8760 (0.95) \times (0.400)$$

$$\$ = 499\,353.28$$

El ahorro que se puede lograr al instalar un variador de velocidad se obtiene al multiplicar el costo anual de operación de \$ 499 353.28 por el porcentaje de ahorro de energía (tomado de la tabla para el sistema con 75% de fricción y con los porcentajes correspondientes del caudal) y con los porcentajes de tiempo de funcionamiento en el ciclo de trabajo. Por tanto:

$$\$ = 499\,353.28 [(0.15 * 0.16) + (0.65 * 0.31) + (0.15 * 0.69)]$$

$$\$ = 164\,287.22$$

El resultado es un ahorro anual de 33% en energía.

3.4 Principio de control para velocidad variable de bombeo

Cuando los usuarios quieren reducir el flujo en un proceso de bombeo, se pueden utilizar válvulas de control para estrangular directamente el flujo, o control por medio de bypass o bien aplicar la alternativa de control de velocidad mediante el uso de un VSD.

Las válvulas de control reducen efectivamente el flujo, la energía consumida es regularmente baja si se usa control de velocidad. El control de encendido y apagado puede ser usado para variar el volumen bombeado en sistemas donde

un flujo intermitente es aceptable. Estos sistemas requieren de instalaciones de almacenamiento.

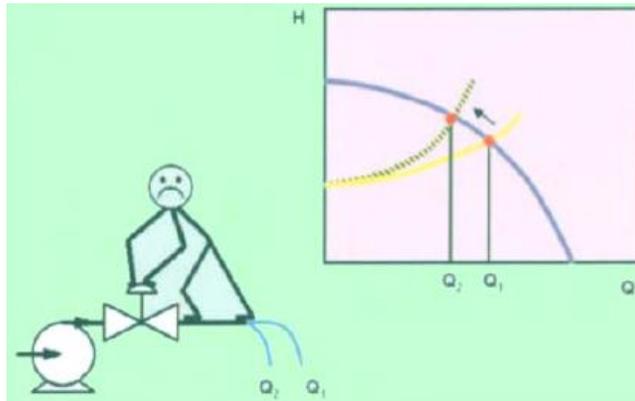


Figura 3.1
Control por estrangulación de válvula.

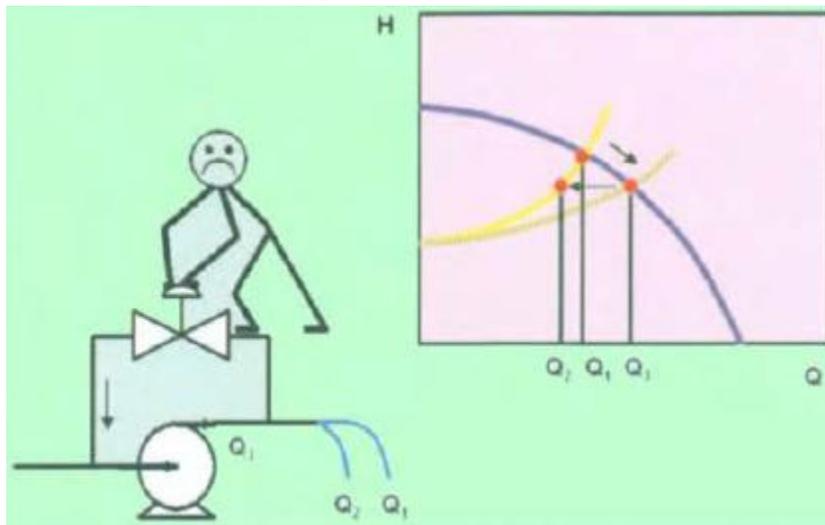


Figura 3.2
Control por By pass

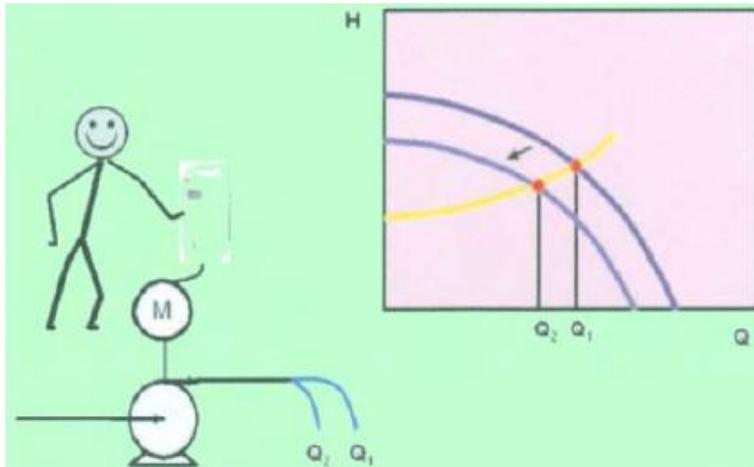


Figura 3.3
Control por velocidad

Si hay carga estática en los sistemas de bombeo, una cantidad sustancial de energía puede ser requerida para elevarla la carga, comparada con la energía requerida para sobreponerse a la fricción en la tubería. Aunque son posibles pequeñas variaciones de velocidad y por lo tanto se logra alcanzar un ahorro de energía

En muchas aplicaciones de bombeo se utilizan bombas en paralelo para producir el gasto requerido, cuando la demanda de flujo varía sustancialmente.

Variación de la velocidad en bombas rotodinámicas

En aplicaciones que requieren control de flujo o presión, particularmente en sistemas con altas pérdidas por fricción, la técnica más efectiva en ahorro de energía es usar un variador de velocidad electrónico, el cual puede variar la velocidad del motor con forme la carga requerida.

La corriente que fluye en un rectificador PWM es proporcional a la potencia entregada, mas pérdidas, además de proporciona un arranque suave muy efectivo a la red de potencia de alimentación al igual que un arrancador de motor.

3.5 Control a presión constante variando la velocidad del flujo

a) Un solo equipo de bombeo

La forma más común de control es por medio de un sensor de presión de descarga, el cual envía una señal al variador de velocidad, que permite que la bomba incremente o decremente el flujo de acuerdo con la demanda del sistema mientras se mantiene la presión constante. Esta forma de control es común en esquemas de alimentación de agua donde se requiere una presión constante pero diferentes velocidades de flujo dependiendo

b) Sistemas de bombeo múltiple

Sí la variación del flujo para la mayoría del tiempo de trabajo es substancial, tal como 5 a 1 o igual a 2 a 1 y la curva del sistema es plana, esto puede inducir al uso de más de una bomba para alcanzar el flujo máximo. Esto puede mejorar la eficiencia del sistema a bajas demandas.

La secuencia de control del sistema inicia las bombas dependiendo de la demanda actual y haciéndolo automáticamente, el cambio de ciclo de las bombas es igual al tiempo de operación. Los sistemas de bombeo múltiple pueden utilizar un simple variador de velocidad para controlar una bomba en combinación con un número de bombas de velocidad definida, de cualquier manera se debe tener cuidado en el análisis de los requerimientos económicos e hidráulicos.

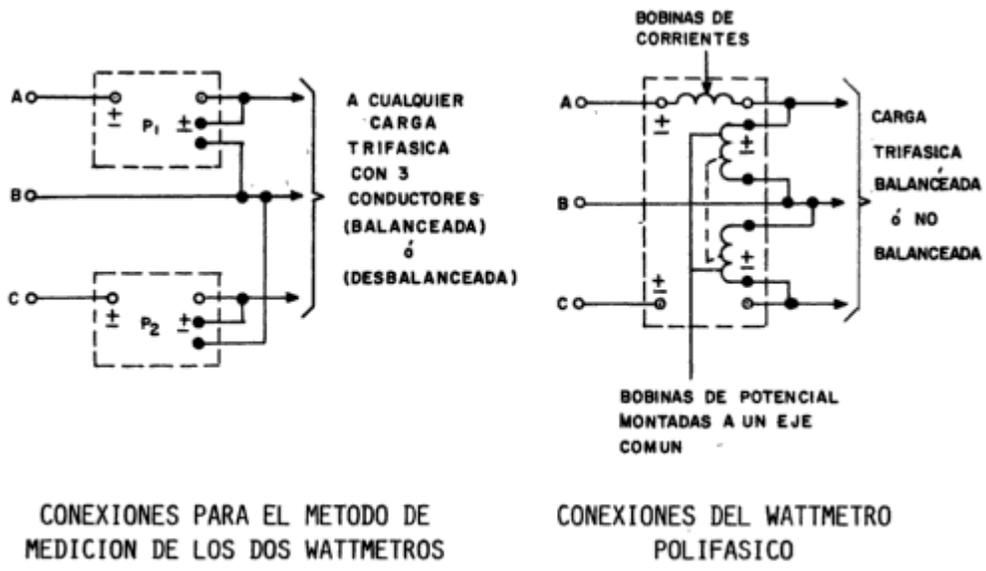
3.6 Equipo de medición eléctrica

Un sistema trifásico puede ser conectado a la carga en delta o en estrella en tres hilos, o también ser de 4 hilos con conexión en estrella, siendo el cuarto hilo el neutro.

Cualquiera que sea el tipo de conexión, la potencia de un sistema trifásico se puede obtener siempre como la suma de las tres potencias circulantes en cualquiera de las fases.

$$P = E_1 I_1 \cos \phi_1 + E_2 I_2 \cos \phi_2 + E_3 I_3 \cos \phi_3 \quad \text{Ec.(3.5)}$$

El método de medición de los dos wattmetros da la potencia activa absorbida ya sea que la carga sea balanceada o desbalanceada. Basándose en este principio se tiene la construcción del wattmetro polifásico, en donde en un instrumento sencillo se tienen dos grupos separados de bobinas de corriente cada uno conectado a una fase. Las bobinas de potencial están montadas sobre un eje común, produciendo un par resultante que refleja el producto $V_L I_L \cos \phi$ donde ϕ es el ángulo entre el voltaje de línea (V_L) y la corriente de línea (I_L) para cada sección del wattmetro.



CONEXIONES PARA EL METODO DE MEDICION DE LOS DOS WATTMETROS

CONEXIONES DEL WATTMETRO POLIFASICO

Figura 3.4
Conexiones para la medición de potencia de los equipos eléctricos.

CAPITULO 4

APLICACIÓN EN SISTEMA DE RIEGO

Para demostrar una aplicación consideremos el caso de un sistema de riego por bombeo de 3800 Ha.

La demanda de agua en cada uno de los meses de un año varía conforme se muestra en la siguiente tabla.

Volúmenes mensuales (miles de m³)

Mes	Miles de m³	Porcentaje
Enero	6559.83	90%
Febrero	4059.8	55.7%
Marzo	1435.87	19.7%
Abril	663.27	9.1%
Mayo	276.97	3.8%
Junio	291.548	4.0%
Julio	357.1463	4.9%
Agosto	3870.29	53.1%
Septiembre	6530.67	89.6%
Octubre	7070.04	97%
Noviembre	7288.7	100%
Diciembre	6997.15	96%

TABLA 4.1 Demanda de volúmenes mensuales

La capacidad de la planta de bombeo, se calcula para satisfacer la demanda de riego en el mes de máximo consumo, con un tiempo de operación de la planta de 24 horas diarias en este mes de máxima demanda, el cual de acuerdo a la tabla resulta ser noviembre, con un volumen requerido de 7,288.7 (miles de metros cúbicos) y un coeficiente unitario de riego de 0.74l/seg./ha, con riego tecnificado resultando un gasto de $Q = 2.812 \text{ m}^3/\text{seg}$.

Analizando una alternativa para un menor consumo de energía eléctrica y costo de operación, vamos a analizar un arreglo de equipos de 8 bombas, para un gasto de 352 l.p.s.

Para la línea de conducción utilizaremos tubería de acero al carbón ASTM-A-53 GR B para la conducción y descarga a la parte alta de un cerro a un tanque de regulación a una elevación de 52.0 m aproximadamente, con una longitud total de 3, 800 m.

Con estos datos podemos plantear los datos del proyecto.

DATOS GENERALES DEL PROYECTO

Gasto de diseño de la planta de bombeo	2812 l.p.s.
Superficie de riego	3800 Ha.
Número de Equipos de Bombeo	8 equipos
Gato por equipo de bombeo	352 l.p.s.
Carga estática	52.00 m.
Longitud de Conducción	3800 m.
Tipo de Bomba a utilizar	Bombas verticales, tipo turbina

DETERMINACION DE LA CARGA DINAMICA TOTAL PARA LOS EQUIPOS DE BOMBEO.

$$C.D.T. = H_{EST} + H_{DIN}$$

C.D.T. = Carga Dinámica total

H_{EST} = Carga estática

H_{DIN} = Carga dinámica

La carga estática será:

$$H_{EST} = 52.00 \text{ m.c.a}$$

La carga dinámica se calculara de acuerdo a:

$$H_{DIN} = h_f \text{ succion} + h_f \text{ descarga} + h_f \text{ conducción} + h \text{ vel.}$$

Donde:

h_f succión = Pérdidas por fricción en la succión

h_f descarga = Pérdidas por fricción en la descarga

h_f conducción = Pérdidas por fricción en la conducción

h vel = Pérdidas por carga de velocidad

DETERMINACION DEL DIAMETRO DE LA TUBERIA DE LA COLUMNA Y DESCARGA

Considerando una velocidad promedio entre 1.5 y 2.5 m/seg, recomendada por el Instituto de Hidráulica, tenemos:

De la ecuación de continuidad.

$$Q = V \times A$$

Donde:

Q = Gasto

V=Velocidad del fluido

A=Área transversal de la tubería

Sustituyendo datos para V= 1.5 m/seg.

$$A = \frac{Q}{V} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{0.352 \text{ m}^3 / \text{seg.}}{1.5 \text{ m/seg.}} = 0.234 \text{ m}^2$$

$$A = \frac{\pi(d)^2}{4}$$

Despejando el diámetro:

$$d = \sqrt{\frac{4xA}{\pi}} \quad \Rightarrow \quad d = \sqrt{\frac{4 \times 0.234}{\pi}}$$

$$d = 0.5458 \quad \approx \quad d = 508 \text{ mm}(20") \phi$$

Por lo tanto, la tubería de 508 mm. (20") ϕ es la tubería comercial correspondiente para las columnas de bombeo y tuberías de descarga.

Para los equipos de bombeo lubricados por aceite, tipo vertical, para un gasto de 352 l.p.s. se propone una tubería de columna bridada, de 20" de ϕ de cubreflecha por 2-3/16" de flecha de transmisión, de acuerdo con los datos técnicos de fabricantes de bombas.

COLUMNA		18" D.E.				20" D.E.				24" D.E.				COLUMNA	
CUBIERTA		3 1/2"	4"	5"	6"	3 1/2"	4"	5"	6"	3"	4"	5"	6"	CUBIERTA	
FLECHA		2 1/4"	2 1/4"	*	*	2 1/4"	2 1/4"	*	*	2 1/4"	2 1/4"	*	*	FLECHA	
LPS	GPM													GPM	LPS
69.4	1100			.10	.13					6.2	6.4	7.4	10.0	28000	1766.5
75.7	1200			.12	.16					6.6	6.9	7.9		29000	1829.6
82.0	1300	.10	.11	.14	.19					7.0	7.3	8.4		30000	1892.7
88.3	1400	.12	.13	.16	.21				.10	7.4	7.8	9.0		31000	1955.8
94.6	1500	.13	.14	.18	.24				.12	7.9	8.2	9.4		32000	2018.9
100.9	1600	.15	.16	.20	.27				.13	8.4	8.7	10.0		33000	2082.0
107.2	1700	.17	.18	.23	.30				.15	8.8	9.2			34000	2145.1
113.5	1800	.19	.20	.25	.34	.11	.10	.12	.17	9.3	9.6			35000	2208.2
119.8	1900	.21	.22	.27	.37	.12	.11	.14	.19						
126.1	2000	.23	.24	.30	.41	.13	.12	.15	.21						
157.7	2500	.34	.36	.45	.61	.20	.19	.23	.34						
189.2	3000	.47	.50	.63	.86	.28	.27	.33	.47	.11	.11	.13	.17		
220.8	3500	.62	.67	.83	1.1	.38	.37	.46	.67	.14	.15	.17	.23		
252.3	4000	.80	.85	1.1	1.4	.47	.46	.59	.80	.18	.19	.22	.29		
283.7	4500	.99	1.2	1.3	1.8	.58	.57	.73	.99	.22	.23	.27	.36		
315.4	5000	1.2	1.3	1.6	2.2	.71	.70	.88	1.2	.27	.28	.33	.44		
347.0	5500	1.4	1.5	1.9	2.6	.84	.83	1.1	1.4	.32	.34	.39	.52		
378.5	6000	1.7	1.8	2.2	3.0	.99	1.0	1.3	1.7	.38	.39	.45	.60		
410.0	6500	1.9	2.1	2.5	3.5	1.2	1.2	1.4	1.9	.44	.45	.53	.70		
441.6	7000	2.2	2.4	2.9	4.0	1.3	1.4	1.6	2.2	.50	.52	.60	.80		
473.1	7500	2.5	2.7	3.3	4.6	1.5	1.6	1.9	2.5	.57	.59	.69	.91		
504.7	8000	2.8	3.0	3.7	5.1	1.7	1.8	2.1	2.8	.64	.66	.77	1.0		
536.2	8500	3.1	3.3	4.1	5.8	1.9	2.0	2.4	3.1	.71	.74	.86	1.2		
567.8	9000	3.5	3.7	4.6	6.4	2.1	2.2	2.6	3.5	.79	.82	.95	1.3		
599.3	9500	3.8	4.1	5.0	7.0	2.3	2.4	2.9	3.8	.87	.90	1.1	1.4		
630.9	10000	4.2	4.5	5.6	7.7	2.5	2.6	3.1	4.2	.96	.99	1.2	1.5		
694.0	11000	5.0	5.3	6.6	9.1	3.0	3.1	3.7	5.0	1.1	1.2	1.4	1.8		
757.1	12000	5.9	6.2	7.7		3.5	3.7	4.4	5.9	1.3	1.4	1.5	2.1		
820.2	13000	6.8	7.2	8.9		4.1	4.2	5.1	6.8	1.5	1.6	1.9	2.4		
883.3	14000	7.7	8.2	10.0		4.7	4.9	5.8	7.7	1.7	1.8	2.1	2.8		
946.4	15000	8.8	9.3			5.3	5.5	6.6	8.8	2.0	2.1	2.4	3.2		
1009.4	16000	9.8				6.0	6.2	7.4	9.8	2.2	2.3	2.7	3.6		
1072.5	17000					6.7	7.0	8.3		2.5	2.6	3.0	4.0		
1135.6	18000					7.4	7.8			2.8	2.9	3.3	4.5		
1198.7	19000					8.2				3.1	3.2	3.7	4.9		
1261.8	20000					9.0				3.4	3.5	4.0	5.4		
1324.8	21000					9.8				3.7	3.8	4.4	5.9		
1388.0	22000									4.0	4.2	4.8	6.4		
1451.1	23000									4.3	4.5	5.2	7.0		
1514.2	24000									4.7	4.9	5.6	7.5		
1577.3	25000									5.0	5.2	6.0	8.1		
1640.3	26000									5.4	5.6	6.5	8.7		
1703.4	27000									5.8	6.0	7.0	9.3		

Tabla 4.2 Datos técnicos manual de bombas Tisa Perless

El área efectiva de flujo en la columna de la bomba será considerando que la tubería de cubreflecha de 3-1/2" ϕ mide exteriormente 4" ϕ .

$$A_{EFECTIVA} = \frac{\pi(0.508)^2}{4} - \frac{\pi(0.102)^2}{4}$$

$$A_{EFECTIVA} = 0.203 \text{ m}^2 - 0.0082 \text{ m}^2$$

$$A_{EFECTIVA} = 0.1948 \text{ m}^2$$

Recalculando la velocidad tenemos:

$$A = \frac{Q}{V} \quad \Rightarrow \quad V = \frac{0.352 \text{ m}^3 / \text{seg}}{0.1948 \text{ m}^2}$$

$$V = 1.81 \text{ m/seg}$$

La cual se considera aceptable

La carga de velocidad será:

$$h_{f \text{ vel}} = \frac{V^2}{2g}; \text{ sustituyendo datos:}$$

$$h_{f \text{ vel}} = \frac{(1.81 \text{ m/seg})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/seg}^2}$$

$$h_{f \text{ vel}} = 0.167 \text{ m.c.a.}$$

Cálculo de pérdidas por fricción

Pérdidas por fricción en la succión

Considerando succión con campana y colador estándar para el equipo de bombeo.

$$h_{f \text{ succion}} = K \times \frac{V^2}{2g} + 1'$$

$$K = 0.05$$

$$h_{f \text{ succion}} = 0.05 \times 0.167 \text{ m.c.a} + 0.304 \text{ m}$$

$$h_{f \text{ succion}} = 0.0025 \text{ m.c.a.}$$

Pérdidas por fricción en la tubería de la columna

Considerando: Longitud de la columna aproximada = 7.0 m.

Diámetro de la columna = 20" x 3-1/2" de diámetro de cubreflecha x 2-3/16" de diámetro de flecha de transmisión.

Consultando tablas de pérdidas por fricción en tuberías de columna, de acuerdo con los fabricantes de los equipos de bombeo tenemos.

Gasto: 352 L.P.S.

$$h_{f \text{ columna}} = \frac{22.96 \text{ ft} \times 0.645 \text{ ft}}{100 \text{ ft}} = 0.148 \text{ ft.}$$

$$h_{f \text{ columna}} = 0.148 \text{ ft.} = 0.045 \text{ m.c.a.}$$

De acuerdo con el diámetro de la tubería de columna y descarga de 508 mm (20") Φ y considerando que el tipo de descarga de los equipos de bombeo, será bajo la superficie propondremos una base soporte del motor eléctrico, de acero estructural para recibir tubería de columna de 20" de diámetro en la succión x 20" de diámetro de descarga, bajo la superficie, para lubricación por medio de aceite.

Pérdida por fricción en el codo del cabezal de descarga a 90°

$$h_{f \text{ cabezal de descarga}} = 0.5 \times \frac{V^2}{2g}$$

$$h_{f \text{ cabezal de descarga}} = 0.5 \times 0.167 \text{ m.}$$

$$h_{f \text{ cabezal de descarga}} = 0.084 \text{ m.c.a.}$$

Pérdidas por fricción en la tubería de descarga

Tomando en consideración un tren de válvulas típico y un arreglo de cuatro equipos de bombeo, tomaremos:

Longitud promedio aproximada = 12m. (39.36 ft)

Diámetro de la tubería = 20" Φ (508 mm)

$$h_{f \text{ tubería de descarga}} = \frac{39.36 \text{ ft} \times 0.645 \text{ ft}}{100 \text{ ft}}$$

$$h_{f \text{ tubería de descarga}} = 0.254 \text{ ft} = 0.077 \text{ m.c.a}$$

Perdida por fricción en la válvula check (Silent Check)

Directamente tomando de tablas del fabricante de las válvulas Silent Check para 20" Φ nominal bridada, con cuerpo de fierro fundido.

$$h_{f \text{ válvula check}} = 1.5 \text{ ft}$$

$$h_{f \text{ válvula check}} = 0.457 \text{ m.c.a}$$

Pérdida por fricción en la válvula de mariposa de acuerdo con la norma AWWA C504 bridada, con cuerpo de fo fo, de 20" nominal.

Consultando tablas de pérdidas para válvulas de mariposa completamente abierta, tenemos: Para válvula bridada, AWWA C504, cuerpo corto, considerándola a 90% de apertura.

$$h_{f \text{ válvula de mariposa}} = 0.23 \text{ ft}$$

$$h_{f \text{ válvula de mariposa}} = 0.070 \text{ m.c.a}$$

Pérdida por fricción en la ampliación de diámetro de la tubería de descarga de la bomba hacia el múltiple de descarga de la bomba (transición).

$$h_{f \text{ transición}} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

$$V_1 = 1.81 \text{ m / seg.}$$

Para determinar V_2 primeramente calcularemos su diámetro de acuerdo con el gasto.

Determinación del diámetro del múltiple de descarga y línea de conducción.

El diámetro del múltiple de descarga, será determinado en función del gasto máximo a conducir.

Gasto de 8 equipos de bombeo = 2816 l.p.s.

Considerando una velocidad de 2.5 m/seg., tenemos:

De la ecuación de continuidad: $Q = V \times A$

$$A = \frac{Q}{V} \quad \therefore \quad A = \frac{2.816 \text{ m}^3 / \text{seg}}{2.5 \text{ m / seg}} = 1.12 \text{ m}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4xA}{\pi}} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \times 1.12 \text{ m}^2}{\pi}} = 1.194 \text{ m.}$$

$d = 1.194 \text{ m.}$ El diametro comercial próximo será 1.22 m. (48")

$$A = \frac{\pi (1.22)^2}{4} = 1.169 \text{ m}^2$$

Recalculando la velocidad tenemos:

$$V = \frac{Q}{A} \Rightarrow V = \frac{2.816 \text{ m}^3 / \text{seg}}{1.169 \text{ m}^2} = 2.41 \text{ m/seg}$$

Por lo tanto la velocidad y el diámetro de 1.22 m. (48") ϕ serán propuestos para la tubería del múltiple de descarga y línea de conducción, en acero al carbón ASTM-A-53 GR. B.

Retomando el cálculo de la pérdida de carga en la transición hacia el múltiple de descarga de 48" ϕ y considerando que la situación crítica será cuando trabaje un solo equipo.

$$V_2 = \frac{0.352 \text{ m}^3 / \text{seg}}{1.169 \text{ m}^2}$$

$$V_2 = 0.30 \text{ m/seg}$$

Tomando en consideración los límites de velocidad para el diseño de tuberías o líneas de conducción relativamente largas; para el barrido del aire que se acumule en el interior de la tubería y remoción de sedimentos, se recomienda que los límites de velocidad sean como mínimo de 0.61 m/seg. a 0.91 m/seg. (2 a 3 pies).

V para 2 equipos de bombeo = 0.6 m/seg.

Como podemos observar, si se disminuye el diámetro de la tubería de conducción, se incrementa la velocidad y en consecuencia, las pérdidas por fricción, por otro lado si se incrementa el diámetro de la conducción, se tendrían problemas para el barrido del aire cuando se operen 1 o 2 equipos.

Por lo anterior la determinación final del diámetro de la tubería del múltiple de descarga y línea de conducción se considerara tubería de acero ASTM-A-53 GRB, de 1219.2 mm. (48") ϕ , considerando que para proporcionar el volumen de agua

requerido en los diferentes meses del año, en todos los casos se requieren de cuando menos dos equipos de bombeo operando.

$$h_{f \text{ transición}} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

Sustituyendo datos:

$$h_{f \text{ transición}} = \frac{(1.81 \text{ m/seg} - 0.6 \text{ m/seg})^2}{2(9.81 \text{ m/seg}^2)}$$

$$h_{f \text{ transición}} = \frac{1.21 \text{ m}^2 / \text{seg}^2}{19.62 \text{ m/seg}^2} = 0.061$$

$$h_{f \text{ transición}} = 0.061 \text{ m.c.a}$$

Pérdida por fricción en el cambio de dirección a 45° en la transición de la descarga de la bomba, con el múltiple.

$$h_{f \text{ 45}^\circ} = K \times \frac{V^2}{2g}$$

Considerando la carga de velocidad de la bomba tenemos:

$$K=0.320$$

$$h_{f \text{ 45}^\circ} = 0.320 \times 0.167 \text{ m.c.a.}$$

$$h_{f \text{ 45}^\circ} = 0.053 \text{ m.c.a.}$$

Pérdidas por fricción en el múltiple de descarga.

La longitud del múltiple de descarga, es de 18 m aproximadamente.

De acuerdo con las tablas del Manual de Hidráulica basadas en la formula de Darcy.

Para la tubería de 1.21 m (48") ϕ nominal, de acero.

Para un gasto máximo de 2816 l. p. s. (44,634 g.p.m.)

Hf= 0.155 ft por cada 100 ft de tubería.

$$h_f = \frac{18.0 \text{ m} \times 3.28 \text{ ft} \times 0.155 \text{ ft}}{100 \text{ ft}}$$

$$h_f = 0.092 \text{ m.c.a}$$

Pérdidas por fricción en el codo a 45°, del múltiple de descarga, estando en operación los 8 equipos de bombeo.

Para los codos de 45°

$$K=0.320; \quad V=1.81 \text{ m/seg.}$$

$$h_{f 45^\circ} = 0.320 \times \frac{(1.81 \text{ m/seg.})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/seg}^2}$$

$$h_{f 45^\circ} = 0.029 \text{ m.c.a.}$$

Perdidas por fricción en la tubería de conducción de 48" de diámetro (121.92 mm)

De acuerdo con las tablas del manual de hidráulica basadas en la formula de Darcy.

Para la tubería de 1.21 m (48") diámetro nominal, de acero para un gasto máximo de 2816 l.p.s. (44,634 g.p.m.), considerando una longitud de 3,800 m.

$$h_f = \frac{3,800 \text{ m} \times 3.28 \text{ ft} \times 0.155 \text{ ft}}{100 \text{ ft}} = 19.32 \text{ ft}$$

$$h_f = 5.89 \text{ m.c.a.}$$

Pérdidas por fricción en los cambios de dirección horizontales de la tubería de conducción de acero de 48" ϕ .

Considerando para la línea de conducción para fines de cálculo de pérdidas por fricción los codos considerados en el trazo del proyecto, los cuales son de las siguientes deflexiones:

Para un gasto de 2816 l.p.s., tomaremos para fines prácticos 2 codos de 60°, 5 codos de 45° y 2 codos de 15°.

Para los codos de 45°

$$K=0.320 \quad ; \quad V=1.81 \text{ m/seg.}$$

$$h_{f\ 45^\circ} = 0.320x \frac{(1.81m / seg.)^2}{2x9.81m / seg^2}$$

$$h_{f\ 45^\circ} = 0.029\ m.c.a. \times 5\ codos = 0.148\ m.c.a.$$

Para los codos de 60°

$$K=0.684 \quad ; \quad V=1.81\ m/seg.$$

$$h_{f\ 60^\circ} = 0.684x \frac{(1.81m / seg.)^2}{2x9.81m / seg^2}$$

$$h_{f\ 60^\circ} = 0.063\ m.c.a. \times 2\ codos = 0.126\ m.c.a.$$

Para los codos de 15°

$$K=0.062 \quad ; \quad V=1.81\ m/seg.$$

$$h_{f\ 15^\circ} = 0.062x \frac{(1.81m / seg.)^2}{2x9.81m / seg^2}$$

$$h_{f\ 15^\circ} = 0.006\ m.c.a. \times 2\ codos = 0.012\ m.c.a.$$

Por lo anterior la perdida por fricción considerada para los cambios de dirección será:

$$h_{F\ CAMBIO\ DE\ DIRECCION} = 0.286\ m.c.a.$$

Perdidas por fricción en la válvula de charnela de 48" de diámetro nominal.

$$K=2.0 \quad V=1.81\ m/seg.$$

$$h_{f\ charnela} = 2.0x \frac{(1.81m / seg.)^2}{2x9.81m / seg^2}$$

$$h_{f\ charnela} = 0.1845\ m.c.a.$$

Por lo anterior la carga dinámica total considerando tubería de conducción de acero, de 48"(1.219 m) Φ nominal, ASTM-A-53 GR B, será:

$$C.D.T = H_{ESTATICA} + H_{DINAMICA}$$

$$H_{ESTATICA} = 52.0 \text{ m.c.a}$$

$$H_{DINAMICA} = 7.93 \text{ m.c.a}$$

$$C.D.T. = 52.0 \text{ m.c.a.} + 7.49 \text{ m.c.a.} = 59.49 \text{ m.c.a}$$

Utilizando la curva de la bomba VTP-24D-1000-1180 de RUHRPUMPEN

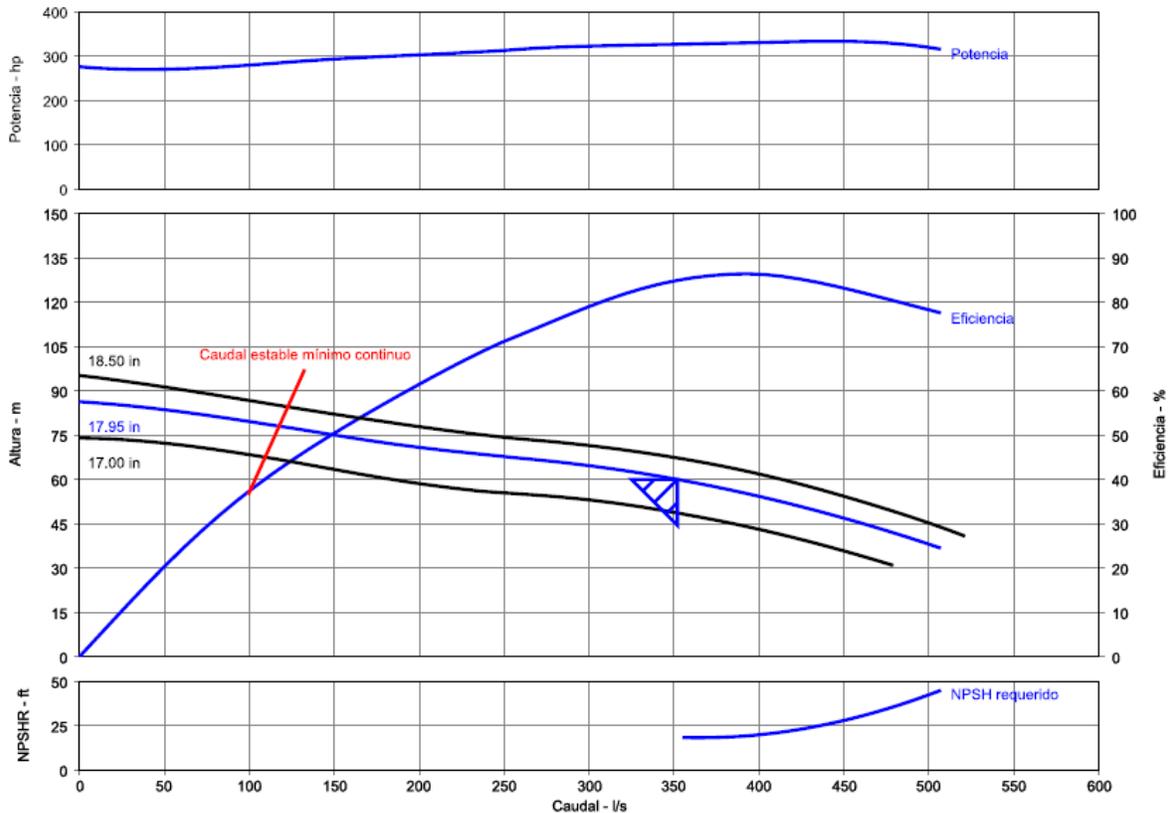


Figura 4.1 Curva característica de bomba VTP-24D-1000-1180 de RUHRPUMPEN

Se puede observar que para el gasto requerido de 352 l.p.s., esta bomba trabaja con una eficiencia del 84.9%, para una carga de 60 m. y un diámetro de impulsor nominal de 17.95 pulgadas, la velocidad nominal de la bomba será de 1180 rpm.

Cálculo de la potencia de los motores eléctricos

$$HP = \frac{Q(L.P.S) \times C.D.T.(m.c.a.)}{76 \times \eta}$$

Con una eficiencia de la bomba de 84.9%.

Sustituyendo valores.

$$HP = \frac{352 \times 60}{76 \times 0.849} = 327.32$$

Se seleccionan motores de 350 HP de potencia, comerciales, tipo vertical, jaula de ardilla, 60 Hz., 440 Volts, 3 Fases.

Cálculo del número de polos del motor eléctrico

$$No. de polos = \frac{120 \times F}{V_s}$$

Donde:

F = 60 Hz

Vs = 1180 rpm

$$No. de polos = \frac{120 \times 60}{1180} = 6 \text{ polos}$$

Cálculo del NPSHD para los equipos de bombeo de 352 l.p.s. y 60 m.c.a. de carga dinámica total.

La carga neta positiva de succión disponible (NPSHD) es la energía necesaria para que el fluido llegue al ojo del impulsor.

$$NPSHD = P_{atm} - h_v + h's - h_{fs}$$

Donde:

P_{atm} = Presión atmosférica a la altitud de la instalación

H_v = Presión de vaporización del agua a la temperatura de bombeo

$h's$ = Carga de succión positiva.

h_{fs} = pérdidas por fricción en la succión.

$h_{fs} = 0.025$ m.c.a

P_{atm} = considerando la instalación de los equipos a la elev. 29.30 msnm.

$P_{atm} = 76.0$ cm Hg.

76.0 cm Hg = 1.03 Kg/cm²

$P_{atm} = 1.03$ Kg/cm² = 10.30 m.c.a.

H_v = Presión de vaporización considerando una temperatura del agua de 21°C

$H_v = 0.36$ PSI = 0.83 pies = 0.254 m.c.a.

$NPSHR = 19.0$ pies = 5.8 m.c.a.

$NPSHD = 10.30$ m – 0.254 m + $h's$ – 0.314 m.

Considerando la carga de succión positiva $h's = 1.50$ m.

$NPSHD = 11.23$ m

Que es mayor a los 5.8 m requeridos por lo tanto se concluye que la opción es correcta

Selección de válvulas de admisión y expulsión de aire para equipos de bombeo.

Dos importantes funciones deben considerarse cuando se va a vaciar o llenar la tubería de descarga de un equipo de bombeo.

1.- La expulsión de aire contenido en una tubería cuando se arranca una bomba de pozo profundo o cárcamo.

2.- La admisión de suficiente cantidad de aire en una tubería cuando se vaya a vaciar y en la tubería de la columna cuando se va a parar un equipo, en este caso prevenir un vacío excesivo que pueda determinar o colapsar ambas tuberías.

Primeramente se determina el gasto máximo en pies cúbicos por segundo que pueda ocurrir en dicho gradiente, ya sea durante el vaciado o llenado de la línea de conducción.

Para calcular el gasto en pies cúbicos de aire por segundo en un sistema de bombeo.

$$PCAS = \frac{Q}{28.32}$$

$$Q = 352 \text{ l.p.s.}$$

$$PCAS = \frac{352}{28.32} = 12.42 \text{ ft}^3 / \text{seg}$$

Con el resultado se deberá elegir el diámetro de la válvula sin exceder de una presión diferencial de 2 lb/pulg².

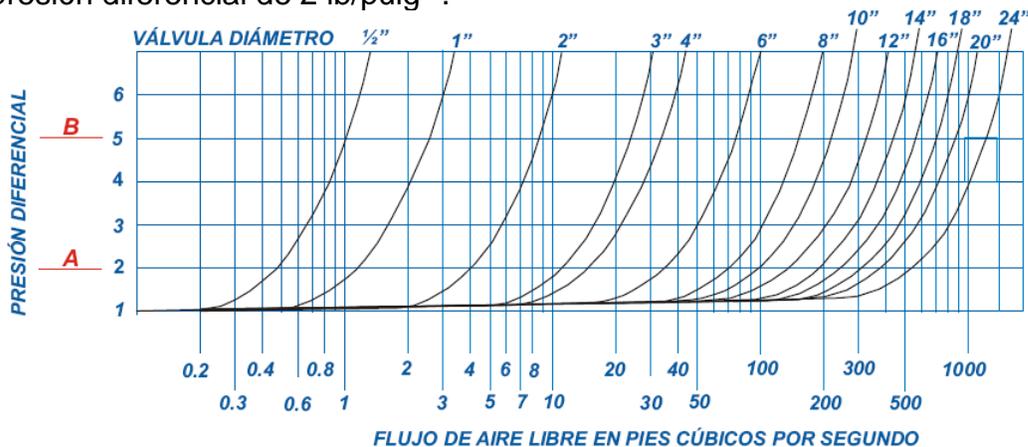


Figura 4.2 Grafica para selección de diámetro de válvula de admisión y expulsión de aire.

Como podemos observar en la grafica para una presión diferencial de 2 lb/pulg² y un gasto en pies cúbicos de aire por segundo de 12.42 ft³/seg corresponde una válvula de 3" de diámetro.

Para el caso de los equipos de bombeo tipo vertical, el diámetro crítico es para la situación de expulsión de aire.

El diámetro mínimo capaz de admitir aire, esta dado por el diámetro de la tubería y la pendiente en metros de altura entre los metros de longitud.

$$PCAS = 0.08665 \sqrt{PD^5}$$

Donde:

$$P = \frac{52.0 \text{ m}}{3800 \text{ m}} = 0.013$$

$$PCAS = 0.08665 \sqrt{0.013 \times 48^5} = 157.70$$

$$PCAS = 157.70 \text{ ft}^3 / \text{seg}$$

Como se puede observar en la grafica para una presión diferencial de 5 lb/pulg² y un gasto de 12.42 ft³/seg. corresponde una válvula de 8" de diámetro.

Calculo de la sobrepresión por golpe de ariete en las tuberías de descarga y conducción de la P.B.

Datos:

Carga dinámica total de los equipos de bombeo	60m.
Diámetro nominal de la tubería de descarga de los equipos de bombeo	508mm (20")
Diámetro nominal de la tubería de conducción	1219.2 mm (48")
Longitud promedio de las tuberías de descarga de los equipos de bombeo	15.0 m
Longitud de la tubería de conducción de la P.B., en acero	3800m
Velocidad en la tubería de descarga	1.81 m/seg
Velocidad en la tubería de conducción	2.41 m/seg

$$T = \frac{2 \times L}{a}$$

Donde:

L = Longitud de la tubería

a = Celeridad de la onda

La sobrepresión por golpe de ariete en m. se calcula con la siguiente fórmula:

$$h_i = \frac{145v}{\sqrt{1 + \frac{Ea \times D}{Et \times e}}}$$

Donde:

V = velocidad de agua en la tubería, en m/seg.

Ea = Modulo de elasticidad del agua, en Kg/cm².

D = Diámetro interior de la tubería, en cm

e = Espesor de la tubería, en cm

Et = Modulo de elasticidad del material de la tubería, en Kg/cm²

L = Longitud de la tubería, en m.

Módulos de elasticidad para algunos materiales:

Material	Kg/cm ²
Acero	2 100,000
Hierro fundido	930,000
Concreto simple	125,000
Asbesto-cemento	210,000
Agua	20,700

Para el caso de la tubería de conducción tenemos

$$h_i = \frac{145 \times 1.81 \text{ m/seg}}{\sqrt{1 + \frac{20,700 \text{ kg/cm}^2 \times 120.65 \text{ cm}}{2100000 \text{ kg/cm}^2 \times 1.27 \text{ cm}}}}$$

$$h_i = 160.18 \text{ m.c.a.}$$

Revisando la carga de trabajo que soportan las tubería de acero de 48" Φ y 12.7 mm. (1/2") de espesor.

$$h_{TRABAJO} = 310 \text{ m.c.a.}$$

$$310 \text{ m.c.a.} > 160.18 \text{ m.c.a.}$$

Por lo que podemos concluir que la tubería de 48" Φ 12.7 mm. (1/2") de espesor es adecuada.

En los anexos se muestra plano general de la planta de bombeo.

Selección del variador de frecuencia

Para seleccionar el variador de frecuencia tomaremos en cuenta los siguientes datos:

Tipo de motor: Inducción Jaula de ardilla
Potencia del motor: 350 HP
Corriente máxima a plena carga: 414 A.
Voltaje nominal: 440 V
Factor de servicio: 1

En el mercado existe una gran variedad de fabricantes de variadores de velocidad, pero no todos ofrecen equipos de una calidad aceptable y reconocida, debido a esto debemos tener cuidado al elegir a nuestro proveedor de equipo, por tal razón para este anteproyecto seleccionaremos un equipo de la marca YASKAWA, debido a que es uno de los fabricantes que se encuentra reconocidos dentro del FIDE.

El modelo CIMR-P7U41850 de la familia P7 de la marca YASKAWA proporciona las siguientes características:

Características de desempeño:

Capacidades: 5-500 HP, 480 VCA
Capacidad de sobrecarga: 110 % del valor nominal durante 60 sec. (150% pico)
Torque de arranque: 100% a 3 Hz.
Rango de control de velocidad: 40:1
Limite de torque: 30 – 180 %
Rectificador de 12 pulsos

Características de protección:

Prueba de prevención para límite de corriente
Reductor de calor para sobre temperatura, retroalimentación de velocidad.
Fusible limitador de corriente de CD.
Controles aislados ópticamente.
Protección contra corto circuito fase a fase y fase a neutro.
Protección contra falla a tierra.
Protección contra bajo y alto torque.
Indicador electrónico de sobrecarga del motor.

Condiciones de servicio

Temperatura ambiente: -10°C a 40°C NEMA 1 y 45°C con protección en el chasis.
Humedad: 95% RH, no condensado
Altitud 3300 ft
Variación del voltaje de entrada: +10%/-15%
Frecuencia de entrada: 50/60 Hz \pm 5%

Opciones

Kit de operación digital remota

Transductor de presión, de 3-15 PSI

Reactor de entrada y/o salida

Rectificador de 12 pulsos con transformador de entrada: 30 – 150 HP a 240 VCA, 40 – 500 HP a 480 VCA.

La hoja completa de datos técnicos de fabricante se pueden ver en anexos catalogo CA.P7.01

De acuerdo con lo descrito en el capítulo 1 podemos decir que tal variador de velocidad es apto para el motor de 350 HP que se propone, este emplea un método de rectificación de 12 pulsos el cual se trata de una tecnología especial que reduce a niveles muy bajos los armónicos de corriente, para favorecer con esto el ahorro de energía, además cuenta con las protecciones, condiciones de servicio y elementos auxiliares necesarios para el conjunto motor-bomba.

Para una mejor referencia en los anexos se puede observar el diagrama unifilar y trifilar de la planta de bombeo.

Análisis de consumo de energía y ahorro económico.

Para realizar el análisis de consumo de energía y ahorro económico usaremos la tabla de volúmenes mensuales y a partir de esto realizaremos una tabla de cantidad de gasto requerido y número de equipos necesarios para satisfacer la demanda.

Mes	Miles de m ³	Gasto en m ³ /s.	Número de equipos.	Gasto no útil en lps.	Potencia consumida por gasto no útil en HP.
Enero	6559.83	2.531	8	285	265.018
Febrero	4059.8	1.567	5	193	179.468
Marzo	1435.87	0.554	2	150	139.483
Abril	663.27	0.256	1	96	89.269
Mayo	276.97	0.106	1	246	228.752
Junio	291.548	0.112	1	240	223.173
Julio	357.1463	0.137	1	215	199.925
Agosto	3870.29	1.493	5	267	248.279
Septiembre	6530.67	2.519	8	297	276.176
Octubre	7070.04	2.727	8	89	82.760
Noviembre	7288.7	2.812	8	4	3.719
Diciembre	6997.15	2.699	8	117	108.797

Tabla 4.3 Tabla de gasto requerido y número de equipos necesarios

De acuerdo con la tarifa de bombeo de agua para riego agrícola establecido en la tarifa 9 – CU de la Comisión Federal de Electricidad el cargo será de \$0.400 (cero punto cuatro cero cero pesos) por cada kilowatt hora de energía eléctrica consumida. Con forme a esto se realizara un cálculo del costo de la potencia consumida por gasto no útil.

Potencia consumida por gasto no útil en HP.	Potencia en Kilowatt	Número de horas por mes	Kilowatt - hora Consumidos en un mes	Costo Mensual de potencia no consumida (en pesos)
265.018	197.703	648	128,111.544	\$51,244.617
179.468	133.883	401	53,687.083	\$21,474.833
139.483	104.054	142	14,775.668	\$5,910.268
89.269	61.373	66	4,050.618	\$1,620.247
228.752	170.649	28	4,778.172	\$1,911.268
223.173	166.487	29	4,828.123	\$1,931.249
199.925	149.144	35	5,220.04	\$2,088.016
248.279	185.216	382	70,752.512	\$28,301.004
276.176	206.027	645	132,887.415	\$53,154.966
82.760	61.739	698	43,093.822	\$17,237.528
3.719	2.774	720	1,997.280	\$798.912
108.797	81.162	691.2	56,099.174	\$22,439.669
Costo Anual Total				\$208,112.577

Tabla 4.3 Costos de energía por potencia no consumida

El costo Anual de potencia no consumida será de \$208,112.577 pesos lo cual representa un costo bastante elevado, que finalmente no será aprovechado debido a que el gasto excedente será estrangulado mediante alguna válvula de control de gasto o bien devuelto hacia el cárcamo por un sistema de by - pass.

El variador de velocidad propuesto tiene un costo de \$17,480.23 dólares como puede observarse en la figura 4.3 tomando una tasa de cambio de 13 pesos por dólar el costo aproximado será de \$227,242.99 pesos, por lo tanto podemos decir que el costo de un variador de velocidad se justifica en aproximadamente un año.

No.	Cantidad	Producto	Precio Unitario	Importe	Moneda
1	1	VARIADOR DE FRECUENCIA		15,200.20	15,200.20 US
MODELO CIMR-P7U41850 . MARCA YASKAWA . VOLTAJE 440 VAC PAR VARIABLE 300/350 H.P. Imax Continua 414 A SOBRECARGA 1MIN 110 %					
TIEMPO DE ENTREGA: 2 SEMANAS					
				Dólares SubTotal sin I.V.A.	15,200.20
				Dólares I.V.A.	2,280.03
				Dólares Total con I.V.A.	17,480.23

Figura 4.3 Costo de variador de velocidad para motor de 350 HP

Se podría utilizar únicamente un variador de velocidad en uno de los equipos de bombeo, para realizar los ajustes de acuerdo al gasto demandado, sobre todo en los meses de enero a septiembre, pero debido a que todos los equipos se encuentran interconectados a una misma tubería de descarga, el equipo que se encuentre operando a una velocidad menor y proporcionando menor gasto, tendrá una carga extra debida a la presión de los demás equipos, esto ocasionara que se opere en un punto con una baja eficiencia; produciendo mayor desgaste en el cuerpo de tazones y mayor consumo de corriente que producirá sobrecalentamiento en los devanados del motor y por consiguiente el variador de velocidad se detendrá.

La implementación de un solo variador de velocidad se presenta rentable a corto plazo, aunque el desgaste producido en bomba y motor y su posible mantenimiento constante y menor tiempo de vida no lo hacen rentable a mediano y largo plazo.

Por lo tanto se considerara implementar ocho variadores de velocidad, uno para cada conjunto motor-bomba, para que de esta manera se proporcione el gasto requerido conjuntamente al variar todos los equipos o una combinación de ellos a una misma velocidad, logrando con esto que el sistema se encuentre balanceado en la tubería de descarga común.

Debido a esto el costo inicial aumenta y el tiempo de justificación económica será aproximadamente de ocho años, se pronostica que el tiempo de vida de la planta de bombeo sin requerir mantenimiento mayor sea de aproximadamente quince años, por lo que en los restantes siete años se producirá un ahorro económico de en energía eléctrica que beneficiara a todos los productores.

Para controlar la velocidad a la que se encuentren operando los motores se requiere de algún transductor que pueda monitorear la presión, el caudal o bien el nivel de agua en el tanque de descarga.

En el plano anexo a este trabajo se muestra un esquema para el control de velocidad del variador, como puede observarse el control a distancia se logra por medio de ondas de radio, permitiendo una comunicación entre el variador de velocidad y los sensores de nivel, no profundizaremos en este aspecto debido a que es un tema bastante extenso.

CONCLUSIÓN

CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE TESIS

Una vez expuesto el contenido del presente trabajo de tesis se derivan las siguientes conclusiones:

Los variadores de velocidad hoy en día se presentan como una buena herramienta en busca del ahorro de energía, tanto por el ahorro económico como por una buena administración de la misma, esto debido a que en los últimos años la demanda de energía eléctrica ha crecido desproporcionalmente respecto a la generación.

Los sectores productivos, particularmente el agrícola sufre de altas cuotas de consumo de energía eléctrica debido a la plantas de bombeo, en muchas ocasiones no es redituable las ganancias obtenidas respecto a la inversión que se tiene que efectuar para producir, el hecho de implementar variadores de velocidad en sus sistemas de bombeo de manera adecuada, proporcionara beneficios en cuanto a las ganancias producidas.

El uso de un variador de velocidad no siempre permite el ahorro de energía, esto dependerá del nivel de la distorsión total de armónicos de corriente que produzca dicho variador de velocidad, por lo tanto es necesario tener especial cuidado al momento de seleccionarlo.

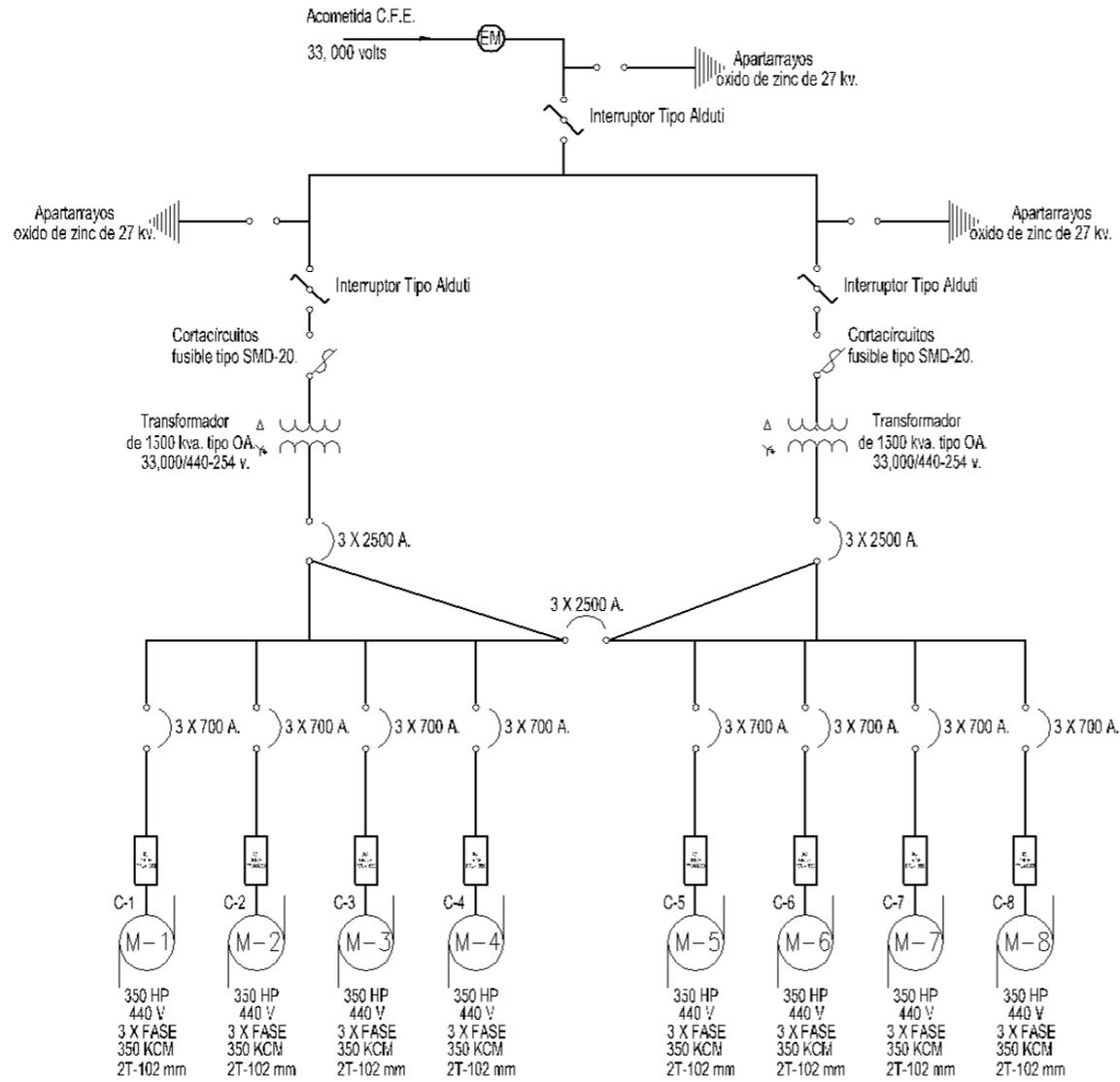
Cuando se tenga un variador de velocidad con alta distorsión total de armónicos se deberá implementar un filtro pasivo externo a este, que permita tener un buen factor de potencia, de lo contrario la facturación por costo de energía tendrá una penalización, por bajo factor de potencia.

Cuando se requiera implementar variadores de velocidad en el control de motores de inducción jaula de ardilla, se deberán considerar las protecciones correspondientes contra sobretemperatura y sobrecarga del motor eléctrico, para asegurar que no dañemos el equipo

Los variadores de velocidad proporcionan un buen control de la velocidad de flujo, en general se reduce considerablemente el costo de operación en todos los sistemas en comparación con las válvulas de estrangulación. En los sistemas con alta carga estática se debe tener cuidado al momento de implementar variadores de velocidad, para evitar trampas de baja eficiencia de bombeo y operar en regímenes de flujo nocivo.

Si bien un variador de velocidad puede sustituir algunos equipos electromecánicos como son válvulas de control (mariposa o compuerta), y arrancadores de motores, para el caso de operación de varios equipos en paralelo no se recomienda sustituir las válvulas que permitirán aislar un equipo para efecto de mantenimiento, reparación o simplemente cuando no se encuentre funcionando. Para el caso del arrancador los variadores pueden ser utilizados como arrancadores suaves para motores de hasta 500 HP.

ANEXOS

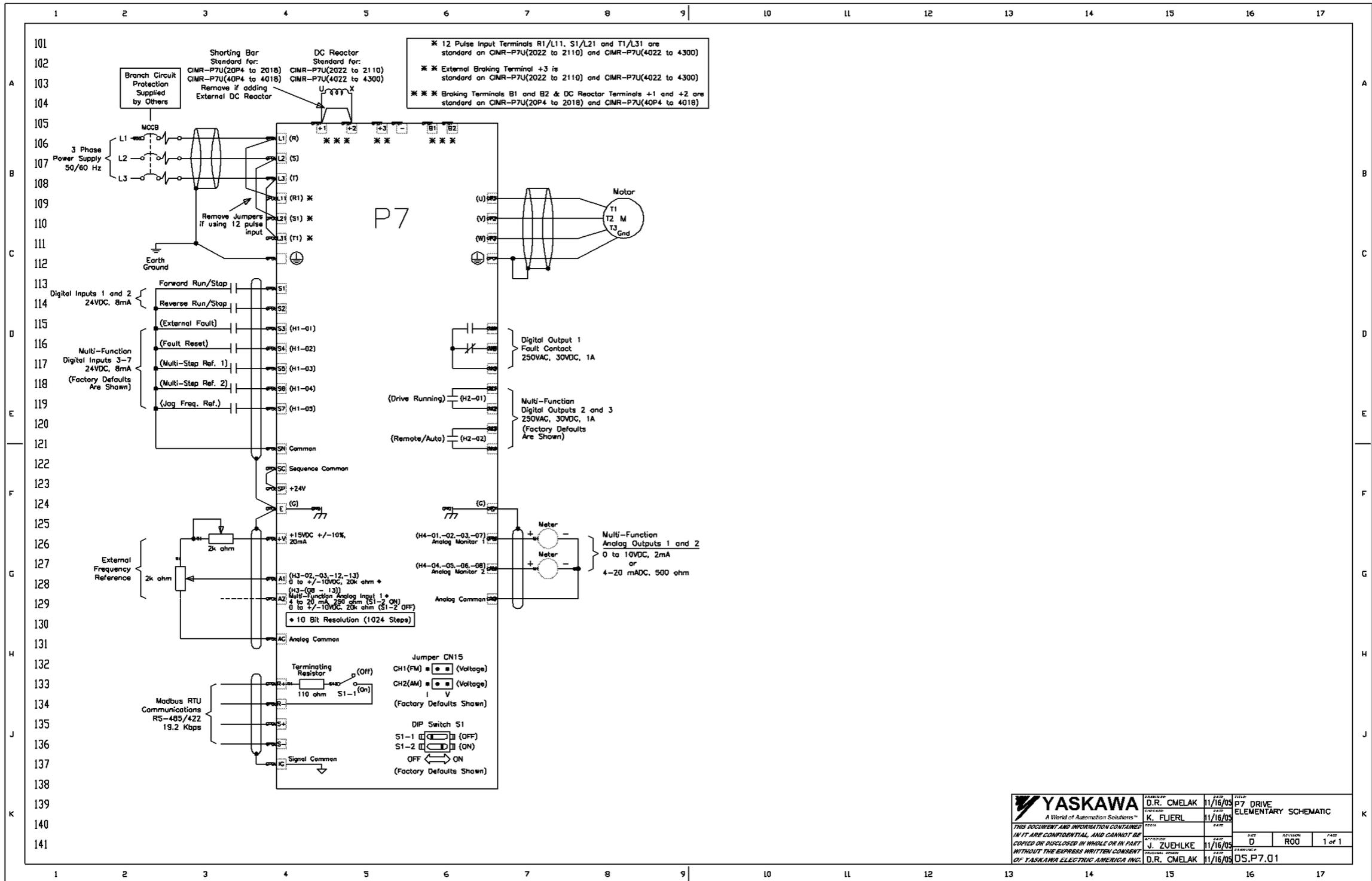


SIMBOLOGÍA

- ACOMETIDA DE C.F.E.
- Ⓜ EQUIPO DE MEDICION DE C.F.E.
- ⚡ APARTARRAYOS
- ⚡ CORTACIRCUITOS
- ⚡ TRANSFORMADOR DE POTENCIA Y DISTRIBUCION
- Ⓜ INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO
- ⚡ INTERRUPTOR ALDUTI
- △ CONEXION EN DELTA

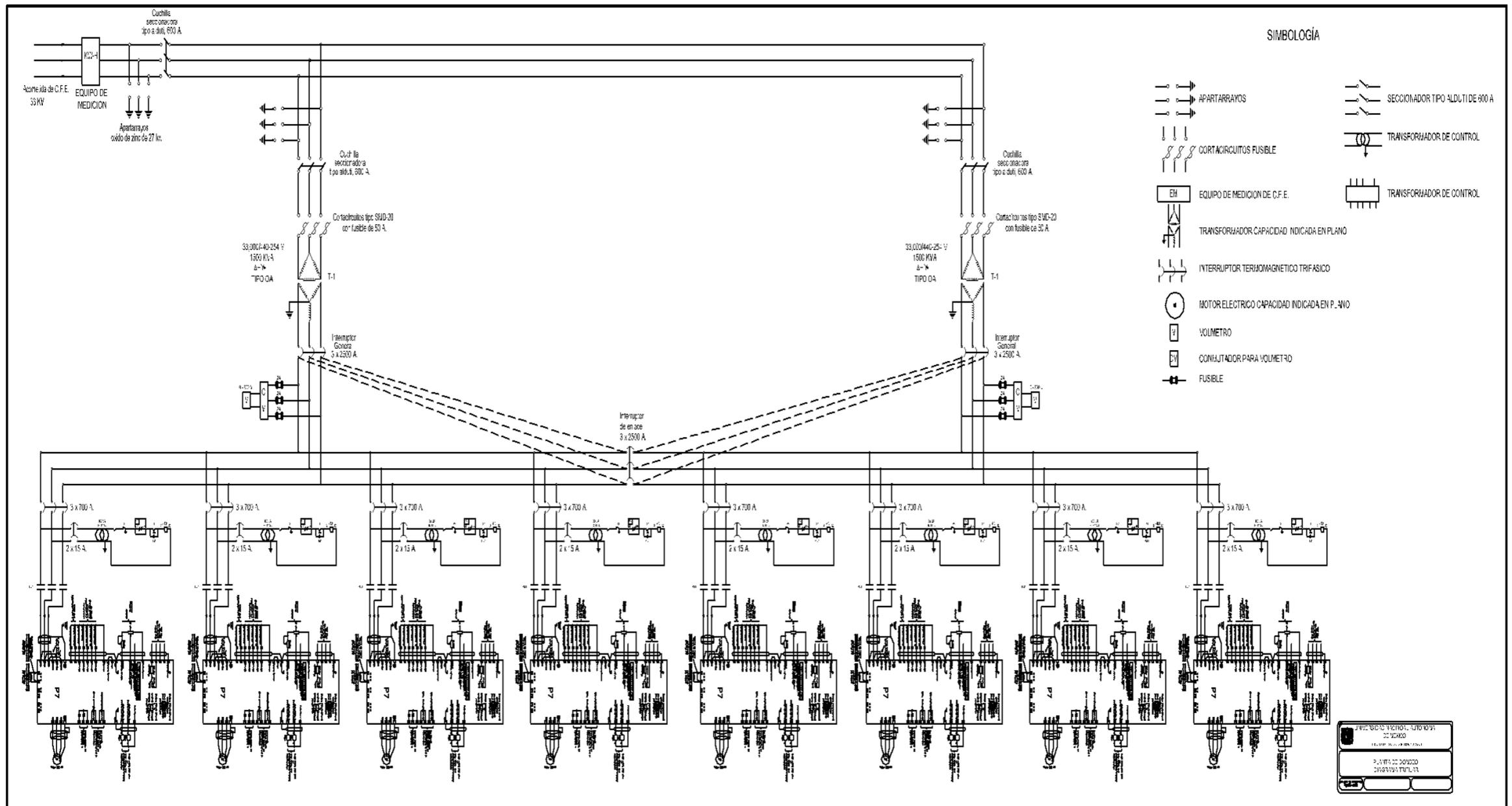
DIAGRAMA UNIFILAR

ANEXO 3 (DIAGRAMA DE CONEXIÓN VARIADOR DE VELOCIDAD)



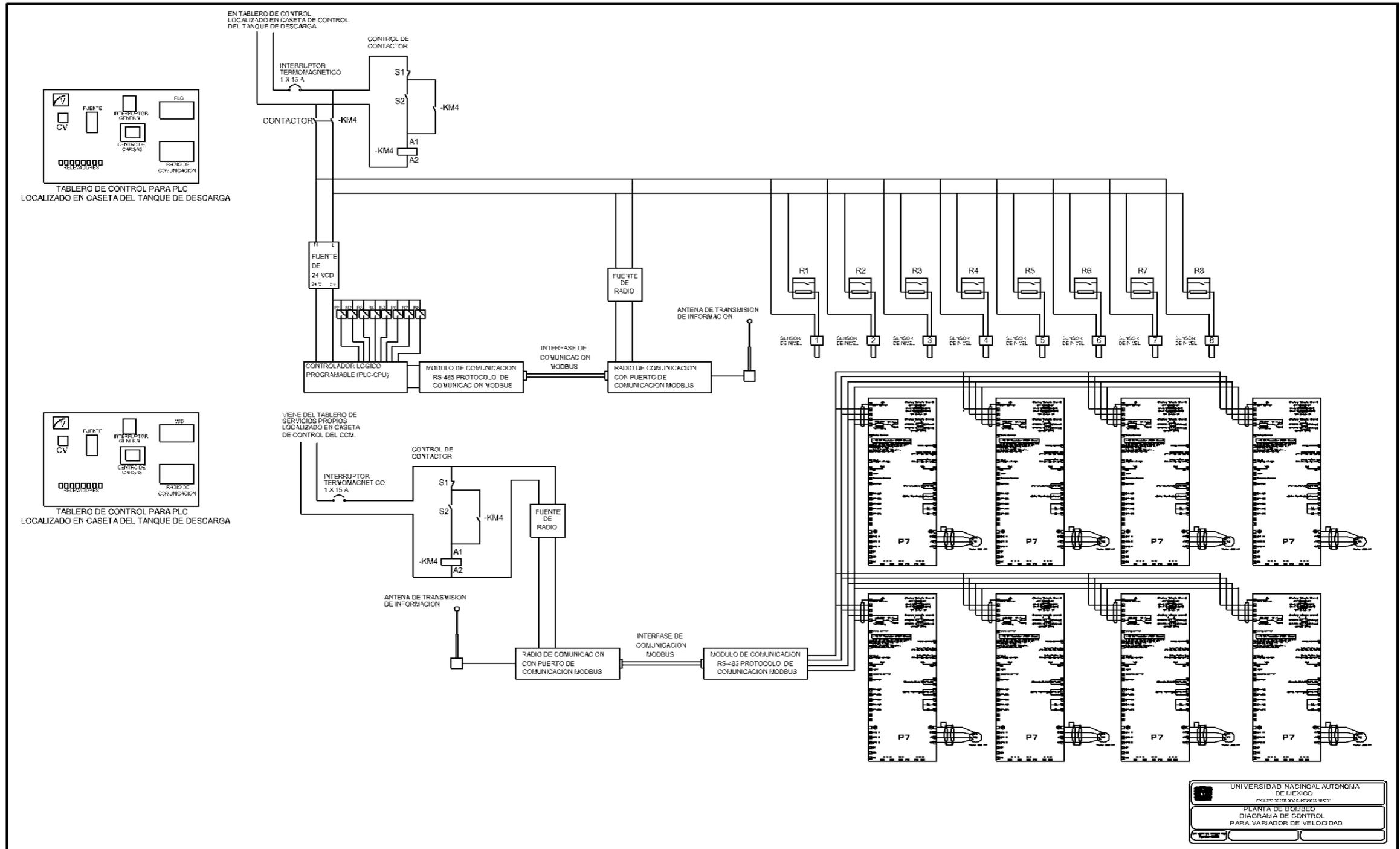
YASKAWA A World of Automation Solutions™		DESIGNED BY D.R. CMELAK	DATE 11/16/09	TITLE P7 DRIVE ELEMENTARY SCHEMATIC		
THIS DOCUMENT AND INFORMATION CONTAINED HEREIN ARE CONFIDENTIAL, AND CANNOT BE REPRODUCED OR DISCLOSED IN WHOLE OR IN PART WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN CONSENT OF YASKAWA ELECTRIC AMERICA, INC.		DESIGNED BY K. FUJERL	DATE 11/16/09	REV D	REVISED BY ROO	PAGE 1 of 1
		APPROVED BY J. ZUEHLKE	DATE 11/16/09	DRAWING NO. DS.P7.01		
		DESIGNED BY D.R. CMELAK	DATE 11/16/09			

ANEXO 4 (DIAGRAMA TRIFILAR)



INSTITUTO VENEZOLANO DE ELECTRICIDAD
 PUNTO DE CONTROL
 DISTRIBUCION TRIFILAR

ANEXO 5 (DIAGRAMA DE CONTROL PARA VARIADOR DE VELOCIDAD)





PILLAR MEXICANA, S.A. DE C.V.

COTIZACION DE PRODUCTOS

CONAGUA

Cotización **534619**
07/Ago/2009

C.P. 00000

Atención: JUAN CARLOS COSME ESPINOZA

Por medio de la presente agradecemos su interés y nos es grato cotizarle lo siguiente:

No.	Cantidad	Producto	Precio Unitario	Importe	Moneda
1	1	VARIADOR DE FRECUENCIA MODELO CIMR-P7U41850 . MARCA YASKAWA . VOLTAJE 440 VAC PAR VARIABLE 300/350 H.P. Imax Continuo 414 A SOBRECARGA 1MIN 110 % TIEMPO DE ENTREGA: 2 SEMANAS		15,200.20	15,200.20 US
				Dólares SubTotal sin I.V.A.	15,200.20
				Dólares I.V.A.	2,280.03
				Dólares Total con I.V.A.	17,480.23

REQUIERE UN ANTICIPO DE US 4,370.12, EL ANTICIPO INCLUYE I.V.A.

CONDICIONES GENERALES
La partida 1 requiere un anticipo del 25%, el resto a la entrega y no es cancelable.
Los precios y tiempos de entrega deben confirmarse al momento de hacer su pedido.
Los productos tienen un año de garantía contra defectos de fabricación, en nuestra planta. La garantía no cubre errores en la instalación, operación o selección. Favor de consultar las indicaciones del manual de operación y/o nuestro departamento técnico.
La mano de obra y materiales para la instalación corren por cuenta de uds., pueden contar con nuestra asesoría sin costo. Si requieren la adaptación de nuestros equipos para interactuar con otros equipos no suministrados por nosotros tendrá un cargo adicional. Favor de solicitar la cotización por separado
Los precios indicados incluyen un descuento que variará en caso de no adquirirse las cantidades y/o productos cotizados.
Su pago puede ser efectuado en cualquiera de las siguientes cuentas: EN MONEDA NACIONAL: BBV-Bancomer Cta. 0445008085 Banamex Cta. 5166223174 H8BC Cta. 4024597486 Inverlat Cta. 107072902 Santander Serfin Cta 65501494822 EN DÓLARES (USCY): BBV-Bancomer Cta. No. 01145-9-6730 Banamex Cta. 516 9503240.
Los precios facturados en dólares se podrán pagar en moneda nacional al tipo de cambio del diario oficial vigente al día de pago.
Los precios de equipos de importación cotizados en pesos están calculados con la paridad del día de la cotización y serán modificados si cambia esta paridad al momento de efectuar su pago.
En equipos que no estén en existencia, su entrega podrá acortarse mediante un cargo adicional. Favor de consultarnos.
Para agilizar su pedido favor de indicarnos domicilio fiscal completo, copia de cédula fiscal e instrucciones de entrega.

Sin otro particular de momento y en espera de verlos favorecidos con su apreciable pedido, quedamos a sus órdenes.

ATENTAMENTE:

ING. MIGUEL DIAZ RUIZ
AGENTE DE VENTAS

ACUERDO que autoriza el ajuste a las tarifas para suministro y venta de energía eléctrica 9-CU y 9-N.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Hacienda y Crédito Público.

AGUSTIN GUILLERMO CARSTENS CARSTENS, Secretario de Hacienda y Crédito Público, con fundamento en los artículos 31, fracción X de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 15, fracción V de la Ley de Planeación; 12, 30, 31 y 32 de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, y 5 de la Ley de Energía para el Campo.

CONSIDERANDO

Que la Secretaría de Energía, a instancias de la Comisión Federal de Electricidad, propuso a esta Secretaría de Hacienda y Crédito Público el ajuste a las tarifas que rigen la venta de energía eléctrica en el país;

Que de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 31 de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, compete a esta Secretaría de Hacienda y Crédito Público, con la participación de las de Economía y de Energía, y a propuesta de la Comisión Federal de Electricidad, fijar las tarifas eléctricas, así como su ajuste;

Que el artículo 5 de la Ley de Energía para el Campo estipula que esta Secretaría de Hacienda y Crédito Público, en coordinación con las de Energía; de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, y de Medio Ambiente y Recursos Naturales, establecerá los precios y tarifas de estímulo de los energéticos agropecuarios, considerando las condiciones económicas y sociales prevalecientes en el ámbito nacional e internacional;

Que en el Acuerdo Nacional para el Campo suscrito el 28 de abril de 2003 se estableció el compromiso del Gobierno Federal de ofrecer a los usuarios agrícolas la posibilidad de acceder a un nivel tarifario que les permita beneficiarse de un menor cargo por el consumo de energía eléctrica en la medida en que administren su demanda y dicho consumo se dé en un horario nocturno;

Que las tarifas agrícolas de estímulo por el consumo de energía eléctrica son parte de las diferentes medidas que se han instrumentado a favor de los productores agrícolas para incrementar la productividad y competitividad de ese sector, al ofrecerles cargos fijos por energía consumida que, manteniendo constante el patrón de consumo, permiten mantener sin variación el costo de la energía eléctrica en los costos totales de producción, con lo que se ha fomentado el desarrollo rural nacional;

Que los estudios realizados en 2005 y 2006 por la "Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación" sobre factores económicos, de producción, de estímulos y de subsidios, muestran comparativamente con países que tienen relación comercial con el sector agrícola mexicano, que las tarifas de estímulo para bombeo de agua para riego agrícola que se aplican en nuestro país, son altamente competitivas a nivel internacional;

Que para otorgar certidumbre sobre los ajustes a los cargos de las tarifas de estímulo para bombeo de agua para riego agrícola para los siguientes ejercicios fiscales, es conveniente establecer los ajustes anuales para los distintos cargos, en el entendido que dichos ajustes permiten compensar parcialmente los incrementos en los costos de suministro y, a la vez, mantienen cargos competitivos para los usuarios agrícolas, cumpliendo el objetivo de ofrecer tarifas de estímulo con cargos menores a las tarifas de uso general.

Que habiendo recabado las opiniones de las secretarías de Energía; de Economía; de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, y de Medio Ambiente y Recursos Naturales, he tenido a bien expedir el siguiente

ACUERDO QUE AUTORIZA EL AJUSTE A LAS TARIFAS PARA SUMINISTRO Y VENTA DE ENERGIA ELECTRICA 9-CU Y 9-N

ARTICULO PRIMERO.- Se autoriza a los organismos descentralizados Comisión Federal de Electricidad y Luz y Fuerza del Centro, a quienes en lo sucesivo se les denominará "el suministrador", el ajuste a las tarifas para suministro y venta de energía eléctrica, conforme a lo dispuesto en el presente Acuerdo.

ARTICULO SEGUNDO.- Se ajusta la Tarifa 9-CU, Tarifa de Estímulo para Bombeo de Agua para Riego Agrícola con Cargo Unico, para quedar en los siguientes términos:

TARIFA 9-CU

TARIFA DE ESTIMULO PARA BOMBEO DE AGUA PARA RIEGO AGRICOLA CON CARGO UNICO

1.- APLICACION

La Tarifa 9-CU se aplicará para la energía eléctrica utilizada en la operación de los equipos de bombeo y rebombeo de agua para riego agrícola por los sujetos productivos inscritos en el padrón de beneficiarios de energéticos agropecuarios, hasta por la cuota energética determinada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

2.- CUOTA APLICABLE MENSUALMENTE

El cargo será de \$0.400 (cero punto cuatro cero cero pesos) por cada kilowatt-hora de energía eléctrica consumida hasta por la cuota energética asignada cada año.

3.- ENERGIA EXCEDENTE

La energía eléctrica consumida que exceda la cuota energética asignada cada año, será facturada con los cargos de la Tarifa 9 ó 9M, Servicio para Bombeo de Agua para Riego Agrícola en Baja o Media Tensión, según corresponda.

4.- TENSION Y CAPACIDAD DE SUMINISTRO

El suministrador sólo está obligado a proporcionar el servicio a la tensión y capacidad disponibles en el punto de entrega.

5.- DEMANDA CONTRATADA

La demanda contratada la fijará inicialmente el usuario y su valor no será menor a la carga total conectada. Cualquier fracción de kilowatt se tomará como kilowatt completo.

6.- DEPOSITO DE GARANTIA

Será de \$20.00 (veinte punto cero cero pesos) por cada kilowatt de demanda contratada.

ARTICULO TERCERO.- Se ajusta la Tarifa 9-N, Tarifa de Estímulo Nocturna para Bombeo de Agua para Riego Agrícola, para quedar en los siguientes términos:

TARIFA 9-N

TARIFA DE ESTIMULO NOCTURNA PARA BOMBEO DE AGUA PARA RIEGO AGRICOLA

1.- APLICACION

La Tarifa 9-N se aplicará para la energía eléctrica utilizada en la operación de los equipos de bombeo y rebombeo de agua para riego agrícola por los sujetos productivos inscritos en el padrón de beneficiarios de energéticos agropecuarios, hasta por la cuota energética determinada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. La inscripción a esta tarifa será a solicitud del usuario.

2.- CUOTAS APLICABLES MENSUALMENTE

El cargo será de \$0.400 (cero punto cuatro cero cero pesos) por cada kilowatt-hora de energía consumida en periodo diurno y de \$0.200 (cero punto dos cero cero pesos) por cada kilowatt-hora de energía consumida en periodo nocturno.

Los cargos se aplicarán a la energía consumida hasta por la cuota energética asignada cada año.

3.- ENERGIA EXCEDENTE

La energía eléctrica consumida que exceda la cuota energética asignada cada año, será facturada con los cargos de la Tarifa 9 ó 9M, Servicio para Bombeo de Agua para Riego Agrícola en Baja o Media Tensión, según corresponda.

Para los efectos del párrafo anterior, en caso de que durante algunos meses del año calendario el usuario haya recibido el servicio con la Tarifa 9-CU, Tarifa de Estímulo para Bombeo de Agua para Riego Agrícola con Cargo Unico, la energía eléctrica facturada con el cargo aplicable conforme al numeral 2 anterior se agregará a la contabilizada con la Tarifa 9-N.

4.- PERIODO NOCTURNO Y PERIODO DIURNO

El periodo nocturno comprenderá de las 0:00 horas a las 08:00 horas y será aplicable todos los días.

El periodo diurno comprenderá de las 08:00 horas a las 24:00 horas y será aplicable todos los días.

Para los efectos de la aplicación de la Tarifa 9-N se utilizarán los horarios locales oficialmente establecidos.

5.- TENSION Y CAPACIDAD DE SUMINISTRO

El suministrador sólo está obligado a proporcionar el servicio a la tensión y capacidad disponibles en el punto de entrega.

6.- DEMANDA CONTRATADA

La demanda contratada la fijará inicialmente el usuario y su valor no será menor de la carga total conectada. Cualquier fracción de kilowatt se tomará como kilowatt completo.

7.- DEPOSITO DE GARANTIA

Será de \$20.00 (veinte punto cero cero pesos) por cada kilowatt de demanda contratada.

ARTICULO CUARTO.- A partir del 2009 las cuotas señaladas en el numeral 2.- CUOTAS APLICABLES MENSUALMENTE de las tarifas 9-CU, Tarifa de Estímulo para Bombeo de Agua para Riego Agrícola con Cargo Único y 9-N, Tarifa de Estímulo Nocturna para Bombeo de Agua para Riego Agrícola, se incrementarán anualmente cada 1 de enero de cada año conforme a lo siguiente:

\$0.020 (cero punto cero dos cero pesos) al cargo por kilowatt-hora de energía consumida de la Tarifa 9-CU, Tarifa de Estímulo para Bombeo de Agua para Riego Agrícola con Cargo Único.

\$0.020 (cero punto cero dos cero pesos) al cargo por kilowatt-hora de energía consumida en periodo diurno de la Tarifa 9-N, Tarifa de Estímulo Nocturna para Bombeo de Agua para Riego Agrícola.

\$0.010 (cero punto cero uno cero pesos) al cargo por kilowatt-hora de energía consumida en periodo nocturno de la Tarifa 9-N, Tarifa de Estímulo Nocturna para Bombeo de Agua para Riego Agrícola.

ARTICULO QUINTO.- A partir del 2009 los depósitos señalados en el numeral 6. DEPOSITO DE GARANTIA de la Tarifa 9-CU, Tarifa de Estímulo para Bombeo de Agua para Riego Agrícola con Cargo Único, y en el numeral 7. DEPOSITO DE GARANTIA de la Tarifa 9-N, Tarifa de Estímulo Nocturna para Bombeo de Agua para Riego Agrícola se incrementarán anualmente cada 1 de enero de cada año en \$1.00 (uno punto cero cero pesos).

TRANSITORIOS

PRIMERO.- El presente Acuerdo entrará en vigor el 1 de enero de 2008.

SEGUNDO.- El presente Acuerdo deberá publicarse en dos periódicos de circulación nacional.

TERCERO.- Se derogan las disposiciones administrativas en materia tarifaria que se opongan a lo establecido en este Acuerdo.

CUARTO.- Para los efectos de lo dispuesto en el ARTICULO SEGUNDO del presente Acuerdo, a los usuarios de la Tarifa 9-CU, Tarifa de Estímulo para Bombeo de Agua para Riego Agrícola con Cargo Único, que habiendo solicitado la aplicación de la Tarifa 9-N, Tarifa de Estímulo Nocturna para Bombeo de Agua para Riego Agrícola, no se les instale el equipo de medición requerido para esta última tarifa por causas atribuibles al suministrador, a partir de la facturación siguiente a la presentación de su solicitud se les aplicará el cargo de la energía consumida de la citada Tarifa 9-CU multiplicado por un factor de 0.833 (cero punto ocho tres tres), independientemente del horario de uso. El suministrador contará con un plazo máximo de 3 meses a partir de la fecha en que notifique al usuario la imposibilidad de aplicar la Tarifa 9-N para remediar las causas que le sean atribuibles y que impidan la instalación de los equipos de medición respectivos.

México, D.F., a 14 de diciembre de 2007.- El Secretario de Hacienda y Crédito Público, **Agustín Guillermo Carstens Carstens**.-
Rúbrica.

GLOSARIO

CA: Corriente Alterna

Campo magnético: Es una región del espacio en la cual una carga eléctrica puntual se desplaza a una velocidad y sufre los efectos de una fuerza que es perpendicular y proporcional tanto a la velocidad como al campo, llamada inducción magnética o densidad de flujo magnético.

Corriente o intensidad eléctrica: Es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe a un movimiento de los electrones en el interior del material.

Cojinete: es un elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a éste, que le sirve de apoyo y facilita su desplazamiento.

Deslizamiento: Define como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor.

Energía eléctrica: Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos —cuando se les coloca en contacto por medio de un conductor eléctrico— para obtener trabajo. La energía eléctrica puede transformarse en muchas otras formas de energía, tales como la energía luminosa o luz, la energía mecánica y la energía térmica.

Fuerza centrífuga: Es la fuerza que tiende a alejar los objetos del centro de rotación del eje mediante la velocidad tangencial, perpendicular al radio, en un movimiento circular.

Fuerza axial: Fuerza que actúa a lo largo del eje longitudinal de un miembro estructural aplicada al centroide de la sección transversal del mismo produciendo un esfuerzo uniforme.

Frecuencia: Es una medida para indicar el número de repeticiones de cualquier fenómeno o suceso periódico en la unidad de tiempo.

Fricción: Fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre la otra (*fuerza de fricción dinámica*) o a la fuerza que se opone al inicio del movimiento (*fuerza de fricción estática*).

Gasto: Se define como volumen de líquido que pasa por la sección transversal de una corriente en la unidad de tiempo.

Golpe de ariete: Se llama golpe de ariete a una modificación de la presión en una conducción debida a la variación del estado dinámico del líquido. En las paradas de las bombas, en el cierre de las válvulas, etc., se produce esta variación de la velocidad de la circulación del líquido conducido en la tubería.

IGBT: Transistor bipolar de puerta aislada es un dispositivo semiconductor que generalmente se aplica como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia.

Impulsor: Es el elemento rotativo de una bomba centrífuga.

Inversor: Dispositivo electrónico que cambia un voltaje de entrada en continua a un voltaje simétrico de salida en alterna, con la magnitud y frecuencias deseadas

Kilowatt-hora: Es una unidad de energía. Equivale a la energía desarrollada por una potencia de un kilovatio (kW) durante una hora, equivalente a 3,6 millones de julios.

Potencia eléctrica: Se define como la cantidad de energía eléctrica o trabajo; energía que se transporta o trabajo que se consume en una determinada unidad de tiempo. Si la tensión se mantiene constante, la potencia es directamente proporcional a la corriente (intensidad). Ésta aumenta si la corriente aumenta.

Presión: Es una magnitud física que mide la fuerza por unidad de superficie, y sirve para caracterizar como se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie.

PWM: Modulador por ancho de pulso.

Torque o par motor: Es la fuerza que es capaz de ejercer un motor en cada giro.

Transductor: Es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra de diferente a la salida

Voltaje: Es una magnitud física que impulsa a los electrones a lo largo de un conductor en un circuito cerrado. También se define como el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico, sobre una partícula cargada, para moverla de un lugar a otro.

VSD: Variador de velocidad por sus siglas en ingles *Variable Speed Drive*

BIBLIOGRAFÍA

1. Malcolm Barnes, Practical Variable Speed Drives and Power Electronics, Great Britain, Ed. Elsevier, 2003.
2. Europump and Hydraulic Institute, Variable Speed Pumping (A guide to successful Application) Great Britain, Ed. Elsevier, 2004.
3. Theodore Baumeister, Eugene A. Avallone, Manual del Ingeniero Mecánico Volumen III segunda edición en español, Ed. McGraw-Hill, 1986.
4. Kenneth J. y el cuerpo de redactores de Chemical, Bombas (selección, uso y mantenimiento), Ed. McGraw-Hill.
5. Comisión Nacional del Agua Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Ahorro y uso eficiente de Energía Eléctrica, México, Documento Técnico, 2009.
6. Comisión Nacional del Agua Uso Eficiente del Agua y Energía Eléctrica, Manual de operación, México 2006.
7. Claudio Mataix, Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas segunda edición, Ed. Oxford University Press, Decimocuarta impresión México 2006.
8. Enríquez Harper, Instrumentos eléctricos (Fundamentos de electricidad), segunda edición, Ed. Limusa, Mexico, 1994.
9. Robert L. Mott, Mecánica de fluidos, Ed. Pearson Prentice Hall, Sexta Edición, México 2006.
10. IEC ingeniería LTDA, porque usar variadores de velocidad de bajo nivel de armónicos, Ed. IEC, Barranquilla Colombia 2009.
11. ABB Automation Products S.A., Guía Técnica de los armónicos con accionamientos de CA, Barcelona España, 2005.
12. Velazco Sánchez Octavio, Comisión Nacional del Agua, Proyectos de plantas de bombeo, México 1980.